

# QUANTIFICAÇÃO DO VALOR DE PRÉ-ESFORÇO EM ELEMENTOS PRÉ-TENSIONADOS

**Rui da Costa Madeira de Carvalho**

(Licenciado em Ciências de Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas  
pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

**Orientador:** Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio

**Júri**

**Presidente:** Professor Doutor António Manuel Pinho Ramos

**Vogais:** Professor Doutor António Lopes Batista

Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio

**Lisboa, 2011**



## AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação apenas foi possível devido à ajuda e ao apoio de várias pessoas, às quais quero prestar o meu profundo agradecimento.

Aos meus pais e à minha namorada, pelo seu constante apoio e motivação em todas as etapas deste trabalho.

Ao Professor Doutor Válder Lúcio, pelo seu apoio, interesse, disponibilidade e, sobretudo, pelos seus ensinamentos que permitiram enriquecer os meus conhecimentos.

À empresa Secil Prebetão, na pessoa do Engenheiro João Oliveira, por ter possibilitado a realização dos ensaios na fábrica da empresa e por ter facultado o material necessário à execução de todos os ensaios desta dissertação.

À Professora Doutora Rosa Miranda, por ter tornado possível a execução do ensaio realizado no DEMI.

Ao Professor Doutor Telmo Santos expresso o meu profundo agradecimento pela sua ajuda, disponibilidade e paciência na preparação do ensaio que teve lugar no DEMI e, ainda, no fabrico das duas peças metálicas utilizadas nos ensaios conduzidos na fábrica da Secil Prebetão.

Ao Professor Doutor João Goes, pela sua boa vontade e total disponibilidade que permitiram a execução do ensaio realizado no DEE.

Ao Engenheiro David Inácio, um grande obrigado pela sua ajuda, disponibilidade e paciência na preparação e execução do ensaio realizado no DEE.

Ao Professor Doutor Corneliu Cismasiu, por ter sugerido o uso do laser e por ter possibilitado a realização do ensaio experimental com este aparelho no DEC.

Ao Engenheiro Filipe Santos, um grande obrigado pela ajuda, disponibilidade e paciência em todos os passos dos ensaios realizados no DEC com o laser e o acelerómetro, desde a montagem dos equipamentos até à programação em *LabVIEW*.

Aos Senhores José Gaspar e Jorge Silvério, pela ajuda e total disponibilidade na preparação dos ensaios laboratoriais realizados no DEC, e no fabrico de todas as peças necessárias à sua execução.

À Serralharia Joaquim Freixo & José Freixo, na pessoa do Senhor Joaquim Freixo, pela paciência e boa vontade que nunca escondeu, sempre que era solicitado para cortar e aparar os fios de pré-esforço.

Aos amigos e colegas, João Nogueira e Leonardo Rodrigues, que contribuíram com ideias construtivas para esta dissertação, e pela companhia que me proporcionaram nos momentos mais difíceis.



## RESUMO

Um problema recorrente em engenharia de estruturas é a quantificação do valor do pré-esforço efectivamente instalado em estruturas existentes. Até à data, não existe nenhum método experimental não destrutivo que permita essa quantificação. Com esta dissertação, pretende-se desenvolver um sistema de quantificação do valor do pré-esforço em elementos pré-tensionados.

Foram realizados quatro grupos de ensaios experimentais em fios de pré-esforço de 5mm de diâmetro, os quais são utilizados no fabrico de perfis I20 pela Secil Prebetão. No primeiro grupo de ensaios experimentou-se quantificar o pré-esforço em função da resistência eléctrica de um fio de pré-esforço. No segundo grupo de ensaios tentou-se determinar o pré-esforço com recurso a sondas de ultra-sons, tendo por base a teoria da acustoelasticidade. No terceiro grupo de ensaios quantificou-se o pré-esforço com base na frequência de vibração fundamental de um fio de pré-esforço, utilizando-se, para isso, o equipamento de medição comercial *Digiforce*, um laser e um acelerómetro.

Os resultados destes testes foram analisados, tendo-se chegado à conclusão de que o laser é o equipamento que apresenta maior potencial para tentar responder à questão abordada nesta dissertação. Para concluir este trabalho, é apresentada uma proposta que visa validar a aplicação deste aparelho numa situação real.

### Palavras-Chave:

Pré-esforço, *Digiforce*, Resistência eléctrica, Ultra-sons, Frequência fundamental



## ABSTRACT

A recurring problem in structural engineering is the measurement of the effective prestress in existing structures. To date, there is no experimental non-destructive method that enables to solve the above stated problem. The purpose of this dissertation is to develop a method to measure the prestress in pre-tensioned elements.

Four groups of tests were conducted in prestress wires with 5mm in diameter, used in the production of I20 sections by Secil Prebetão. In the first group of tests, an experiment was conducted to relate electrical resistance changes with the applied tension to a prestress wire. In the second group of tests, ultrasound probes were used in an attempt to measure the prestress installed in a steel wire, based on the acoustoelasticity theory. In the third group of experiments, the prestress force was determined, based on the fundamental frequency of a prestress wire, with the non-contact tension meter Digiforce, a laser device and an accelerometer.

The results of the above mentioned tests were analyzed and the laser device turned out to be the most effective equipment that will, probably, address the issue stated in this dissertation. Finally, a proposal is presented to validate the use of this device in a practical situation.

### Keywords:

Prestress, Digiforce, Electrical resistance, Ultrasond, Fundamental frequency





# ÍNDICE

1	Introdução .....	1
1.1	Processo de fabrico de elementos pré-tensionados .....	1
1.1.1	Posicionamento dos fios de pré-esforço .....	1
1.1.2	Tensionamento dos fios de pré-esforço .....	4
1.1.3	Betonagem .....	4
1.2	Objectivo da dissertação .....	5
1.3	Organização da dissertação.....	6
2	Estado da Arte .....	7
2.1	Especificação LNEC E440-1995 .....	7
2.2	Extensómetros eléctricos de resistência .....	7
2.2.1	Tipos de extensómetros eléctricos de resistência .....	8
2.2.2	Geometria dos extensómetros .....	8
2.2.3	Outros tipos de extensómetros .....	9
2.2.4	Medição de extensões com uma ponte de <i>Wheatstone</i> .....	11
2.3	Extensómetros acústicos .....	15
2.3.1	Extensómetros de corda vibrante.....	15
2.3.2	<i>Digiforce</i> .....	16
2.4	Extensómetros de fibra óptica.....	17
2.4.1	Sensores interferométricos de <i>Fabry-Pérot</i> .....	18
2.4.2	Sensores de fibra óptica com redes de <i>Bragg</i> .....	20
2.4.3	Sensores interferométricos <i>SOFO</i> .....	23
2.4.4	Sensores distribuídos de dispersão de Brillouin e de dispersão de Raman.....	25
2.5	Ultra-sons .....	27
2.5.1	Transdutores piezoeléctricos .....	27
2.5.2	Transdutores acústicos electromagnéticos ( <i>EMAT</i> ) .....	29
2.5.3	Trabalho de <i>Chaki e Bourse</i> .....	30
2.5.4	Trabalho de <i>Wahser, Green e Pond Jr.</i> .....	33
2.6	Sensores elastomagnéticos .....	36
2.6.1	Modo de funcionamento.....	37

2.6.2	Aplicações em Engenharia Civil .....	38
2.7	Difracção de Raios-X e Método do Furo Cego.....	38
2.7.1	Difracção de raios-X .....	38
2.7.2	Método do furo cego .....	39
3	Ensaio por medição da resistência eléctrica .....	41
3.1	Objectivo .....	41
3.2	Trabalhos preparatórios.....	41
3.2.1	Isolamento eléctrico do fio de pré-esforço.....	41
3.2.2	Montagem do sistema de pré-esforço .....	42
3.2.3	Ligação do sistema eléctrico ao fio de pré-esforço .....	43
3.3	Fundamentos teóricos .....	44
3.4	Procedimento experimental .....	45
3.5	Registo e análise de resultados .....	46
3.5.1	Curva de calibração experimental .....	46
3.5.2	Curva de calibração teórica .....	47
3.5.3	Análise dos resultados teóricos e experimentais .....	48
3.6	Considerações finais .....	49
4	Ensaio com ultrassons .....	51
4.1	Objectivo .....	51
4.2	Trabalhos preparatórios.....	51
4.2.1	Escolha do transdutor piezoeléctrico.....	51
4.2.2	Sistema de pré-esforço e sistema de ultra-sons .....	54
4.2.3	Determinação da velocidade de propagação das ondas sonoras .....	54
4.3	Procedimento experimental.....	56
4.3.1	Medição de $\Delta t$ entre ondas sonoras emitidas e recebidas.....	56
4.3.2	Cálculo da curva de calibração .....	56
5	Ensaio por medição de vibrações .....	59
5.1	Ensaio realizados com o <i>Digiforce</i> .....	59
5.1.1	Objectivo .....	59
5.1.2	Testes laboratoriais .....	59
5.1.3	Registo e análise de resultados .....	69

---

5.1.4	Testes realizados na fábrica da Secil Prebetão .....	74
5.1.5	Registo e análise de resultados .....	77
5.2	Ensaio realizado com um laser e um acelerómetro .....	79
5.2.1	Objectivo.....	79
5.2.2	Sistema de pré-esforço .....	79
5.2.3	Equipamentos de medição .....	79
5.2.4	Sistema de aquisição de dados .....	81
5.2.5	Procedimento experimental.....	83
5.2.6	Registo e análise de resultados .....	83
5.3	Considerações finais .....	85
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros .....	87
6.1	Ensaio experimental por medição da resistência eléctrica .....	87
6.2	Ensaio por ultrassons .....	87
6.3	Testes realizados com o <i>Digiforce</i> .....	87
6.4	Ensaio experimental com o laser e acelerómetro .....	88
6.5	Propostas para desenvolvimentos futuros .....	89
	Referências Bibliográficas .....	91
	Anexo 1 – Peças metálicas .....	95
	Anexo 1.1 – Perfil longitudinal .....	95
	Anexo 1.2 – Perfil transversal.....	96
	Anexo 1.3 – Vista de cima .....	97
	Anexo 2 – Calços de <i>PMMA</i> .....	98



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mira de posicionamento dos fios de pré-esforço .....	2
Figura 1.2 - Armazenamento dos fios de pré-esforço .....	2
Figura 1.3 - Fixação dos fios de pré-esforço ao veículo de transporte .....	3
Figura 1.4 - Fixação dos fios de pré-esforço no ponto de chegada do veículo .....	3
Figura 1.5 - Fixação dos fios de pré-esforço no ponto de partida do veículo .....	3
Figura 1.6 - Tensionamento dos fios de pré-esforço .....	4
Figura 1.7 - Veículo de betonagem e balde de descarga .....	5
Figura 1.8 - Molde em aço dos elementos a serem betonados .....	5
Figura 2.1 - Extensómetro pelicular [28] .....	8
Figura 2.2- Rosetas rectangulares [35] .....	9
Figura 2.3 - Rosetas triangulares [35] .....	9
Figura 2.4 - Célula de carga [40] .....	9
Figura 2.5 - Extensómetro mecânico "PI" [44] .....	10
Figura 2.6 - Extensómetro mecânico <i>DEMEC</i> [47] .....	10
Figura 2.7 - Extensómetro mecânico <i>Zwick</i> [49] .....	11
Figura 2.8- Esquema de uma ponte de <i>Wheatstone</i> [35] .....	11
Figura 2.9 - Tipo de ligações à ponte de <i>Wheatstone</i> [35] .....	13
Figura 2.10 - Montagem a dois fios de um extensómetro em um quarto de ponte [15] .....	14
Figura 2.11 - Montagem a três fios de um extensómetro em um quarto de ponte [15] .....	15
Figura 2.12 - Primeiro modo de vibração de uma corda tensionada [29] .....	15
Figura 2.13 – <i>Digiforce</i> [1] e respectivo martelo de aço .....	16
Figura 2.14 – Constituição de uma fibra óptica e propagação da luz no seu interior [4] .....	17
Figura 2.15 - Tipos de sensores de fibra óptica [8] .....	18
Figura 2.16 - Constituição de um sensor de <i>Fabry-Pérot</i> [27] .....	19
Figura 2.17 - Localização dos sensores numa secção do tabuleiro da ponte <i>Liaohe</i> [5] .....	20
Figura 2.18 - Extensões obtidas pelos sensores de fibra óptica e pelos extensómetros devido à passagem do comboio [5] .....	20
Figura 2.19 - Espectro de luz emitida, transmitida e reflectida .....	21
Figura 2.20 - Ponte de <i>Stork</i> em <i>Winterthur</i> , Suíça .....	22
Figura 2.21 – Posição das redes de <i>Bragg</i> nos cabos de <i>CFRP</i> [30] .....	22
Figura 2.22 - Constituição do sistema <i>SOFO</i> [18] .....	23
Figura 2.23 - Picos de interferência registados por um sensor <i>SOFO</i> [20] .....	24
Figura 2.24 - Secção do tabuleiro da nova ponte de <i>Versoix</i> [19] .....	25
Figura 2.25 - Dispersão da luz emitida: componente de <i>Rayleigh</i> , <i>Brillouin</i> e <i>Raman</i> [7] .....	26
Figura 2.26 - Barragem de <i>Plavinu</i> , Letónia [7] .....	27
Figura 2.27 - Instalação dos sensores de difusão de <i>Brillouin</i> na galeria de inspecção [7] .....	27
Figura 2.28 - Exemplo de um transdutor de contacto [38] .....	28
Figura 2.29 - <i>EMAT's</i> baseados no mecanismo das forças de <i>Lorentz</i> [17] .....	29

Figura 2.30 - <i>EMAT's</i> magnetostrictivos [17].....	30
Figura 2.31 – Montagem dos equipamentos utilizados nos ensaios de <i>Chaki</i> e <i>Bourse</i> [3].....	31
Figura 2.32 – Medição do desfasamento entre ondas ultra-sonoras captadas [3] .....	31
Figura 2.33 - Curvas de calibração acustoelásticas obtidas por <i>Chaki</i> e <i>Bourse</i> [3].....	32
Figura 2.34 - Sistema de ensaio adoptado por <i>Washer, Green</i> e <i>Pond Jr.</i> [46] .....	34
Figura 2.35 - Curva de calibração obtida para o Cordão 3 [46].....	35
Figura 2.36 - Curva de calibração obtida para o Fio 1 [46].....	36
Figura 2.37 – Corte longitudinal de um sensor elastomagnético [41] .....	37
Figura 2.38 - Curvas de calibração obtidas para um cordão com 15,5 mm de diâmetro a temperaturas de 22 °C e 72 °C [11].....	38
Figura 2.39 - Difraccção de raios-X em planos cristalinos [37].....	39
Figura 3.1 - Isolamento eléctrico do fio de pré-esforço com 1,2 m de comprimento .....	41
Figura 3.2 - Esquematização do sistema de pré-esforço utilizado para o ensaio feito no DEE .....	42
Figura 3.3 - Vista global de todos os equipamentos usados para o ensaio feito no DEE .....	43
Figura 3.4 - Ligação do sistema eléctrico.....	44
Figura 3.5 - Curva de calibração de $R$ e $F_{célula}$ obtida experimentalmente .....	47
Figura 3.6 - Recta de calibração de $R$ e $F_{célula}$ esperada .....	48
Figura 4.1 - Torno mecânico usado no fabrico dos calços em <i>PMMA</i> .....	52
Figura 4.2 - Calços em <i>PMMA</i> .....	52
Figura 4.3 - Adaptação dos calços ao transdutor com 12 mm de diâmetro.....	53
Figura 4.4 - Sondas com 6 mm de diâmetro .....	53
Figura 4.5 - Esquema de ligação do sistema de ultra-sons .....	54
Figura 4.6 - Comprimentos do fio de aço sujeitos a tensões nulas e não nulas.....	56
Figura 5.1 – Montagem do sistema para a execução dos ensaios laboratoriais no DEC .....	60
Figura 5.2 - Fixação do fio de pré-esforço com 2,5 m na extremidade direita.....	60
Figura 5.3 - Montagem do sistema de pré-esforço e de leitura .....	61
Figura 5.4 - Posicionamento dos painéis de protecção .....	61
Figura 5.5 - Montagem dos extensómetros.....	62
Figura 5.6 - Ligação dos extensómetros e da célula de carga ao <i>data logger</i> .....	63
Figura 5.7 - Posicionamento correcto do fio de pré-esforço .....	64
Figura 5.8 - Sistema de grampos .....	65
Figura 5.9 - Ganchos utilizados na suspensão do sistema de grampos.....	65
Figura 5.10 - Ímanes usados no controlo da vibração do sistema de grampos.....	66
Figura 5.11 - Redução do vão livre com perfis <i>RHS</i> .....	67
Figura 5.12 - Distância do vão livre entre perfis <i>RHS</i> e pormenor dos pontos de fixação .....	67
Figura 5.13 - Redução do vão livre com sistema de cunhas .....	68
Figura 5.14 - Distância do vão livre entre cunhas e pormenor dos pontos de fixação .....	69
Figura 5.15 – Fixação de um fio de pré-esforço tensionado com uma peça metálica.....	75
Figura 5.16 - Distância do vão livre entre peças metálicas.....	76
Figura 5.17 - Amortecimento de eventuais vibrações das peças metálicas com um cubo de betão ...	76

Figura 5.18 - Montagem do sistema de grampos na pista da fábrica.....	77
Figura 5.19 - Amortecimento de eventuais vibrações do sistema de grampos com cubos de betão ..	77
Figura 5.20 - Sistema de ensaio com o laser.....	80
Figura 5.21 - Posicionamento do laser .....	80
Figura 5.22 - Posicionamento do acelerómetro .....	81
Figura 5.23 - Equipamento de processamento de dados .....	81
Figura 5.24 - Sinal gravado de uma corda de guitarra [26] .....	82
Figura 5.25 - Espectro de frequências da corda de guitarra [26].....	82





## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Constantes acustoelásticas calculadas para os três cordões utilizados [46] .....	35
Tabela 2.2 - Constantes acustoelásticas calculadas para os quatro fios utilizados [46] .....	36
Tabela 3.1 - Valores de $U$ , $I$ e $R$ para 0 kN .....	46
Tabela 3.2 - Valores de $U$ , $I$ e $R$ para 5 kN .....	46
Tabela 3.3 - Valores de $U$ , $I$ e $R$ para 10 kN .....	46
Tabela 3.4 - Valores de $U$ , $I$ e $R$ para 15 kN .....	46
Tabela 3.5 - Valores de $U$ , $I$ e $R$ para 20 kN .....	46
Tabela 3.6 - Valores médios da resistência eléctrica para cada fase de carregamento .....	47
Tabela 3.7 - Variação da resistência eléctrica com o pré-esforço aplicado .....	48
Tabela 4.1 - Características da sonda com 12mm de diâmetro .....	51
Tabela 4.2 - Características da sonda com 6 mm de diâmetro .....	53
Tabela 4.3 - Velocidades de propagação em vários fios de aço com 5mm de diâmetro .....	55
Tabela 5.1 - Valores registados no Ensaio 1 .....	70
Tabela 5.2 – Comparação entre $F_{célula}$ , $F_{Hooke}$ , e $F_{Digiforce}$ para o Ensaio 1 .....	70
Tabela 5.3 - Valores registados no Ensaio 2 .....	70
Tabela 5.4 - Comparação entre $F_{célula}$ , $F_{Hooke}$ , e $F_{Digiforce}$ para o Ensaio 2 .....	70
Tabela 5.5 - Valores registados no Ensaio 3 para um vão de 0,6 m .....	71
Tabela 5.6 - Valores registados no Ensaio 3 para um vão de 0,4 m .....	71
Tabela 5.7 - Valores registados no Ensaio 3 para um vão de 0,2 m .....	71
Tabela 5.8 - Diferença entre $F_{Hooke}$ e $F_{célula}$ para o Ensaio 3 .....	71
Tabela 5.9 - Diferença entre $F_{Digiforce}$ e $F_{célula}$ para o Ensaio 3 .....	72
Tabela 5.10 - Valores registados no Ensaio 4 para um vão de 0,6 m .....	72
Tabela 5.11 - Valores registados no Ensaio 4 para um vão de 0,4 m .....	73
Tabela 5.12 - Valores registados no Ensaio 4 para um vão de 0,2 m .....	73
Tabela 5.13 - Diferença entre $F_{Hooke}$ e $F_{célula}$ para o Ensaio 4 .....	73
Tabela 5.14 - Diferença entre $F_{Digiforce}$ e $F_{célula}$ para o Ensaio 4 .....	73
Tabela 5.15 - Características dos perfis I20 .....	74
Tabela 5.16 – Forças obtidas com o <i>Digiforce</i> [1] sem usar cubos de betão como pesos .....	78
Tabela 5.17 – Forças obtidas com o <i>Digiforce</i> [1] usando cubos de betão como pesos .....	78
Tabela 5.18 – Forças obtidas com o <i>Digiforce</i> [1] sem usar as peças metálicas como pesos .....	78
Tabela 5.19 – Forças obtidas com o <i>Digiforce</i> [1] usando as peças metálicas como pesos .....	78
Tabela 5.20 - Dados registados para o Ensaio A .....	83
Tabela 5.21 - Dados registados para o Ensaio B .....	83
Tabela 5.22 - Ensaio A: Comparação de $f_{exacta}$ com $f_{laser}$ e de $F_{célula}$ com $F_{laser}$ .....	84
Tabela 5.23 - Ensaio B: Comparação de $f_{exacta}$ com $f_{acel}$ e de $F_{célula}$ com $F_{acel}$ .....	84
Tabela 5.24 - Tempo de resposta do laser para um fio com dois vãos distintos .....	85



---

## LISTA DE LETRAS LATINAS

A	Área da secção transversal de um fio de pré-esforço
$A_s$	Área transversal de um material ferromagnético
$A_t$	Área transversal da bobine secundária de um sensor elastomagnético
B	Campo magnético estático
B	Módulo de compressibilidade
C1	Canal 1 do osciloscópio digital
C2	Canal 2 do osciloscópio digital
d	Espaçamento médio entre planos cristalinos
$d_0$	Espaçamento médio entre planos cristalinos para um estado de tensão nula
E	Módulo de elasticidade
f	Frequência de vibração
F	Força de tracção
F	Força de <i>Lorentz</i>
$f_{\text{acel}}$	Frequência obtida com o acelerómetro
$F_{\text{acel}}$	Força obtida com o acelerómetro
$F_{\text{célula}}$	Força de tensionamento registada pela célula de carga
$F_{\text{Digiforce}}$	Força de tensionamento registada pelo <i>Digiforce</i>
$f_{\text{exacta}}$	Frequência exacta
$F_{\text{Hooke}}$	Força de tensionamento calculada pela lei de Hooke
$f_{\text{laser}}$	Frequência obtida com o laser
$F_{\text{laser}}$	Força obtida com o laser
$F_{\text{max}}$	Força máxima
$f_{\text{puk}}$	Tensão de rotura do aço de pré-esforço
G	Factor do extensómetro
I	Intensidade
J	Correntes de <i>Eddy</i> induzidas
K	Constante acustoelástica
L	Comprimento/Distância
$L_0$	Distância inicial entre os braços do extensómetro mecânico

$L_0 + \Delta L$	Distância final entre os braços do extensómetro mecânico
$L_c$	Comprimento de coerência
$L_{\text{cavidade}}$	Comprimento da cavidade <i>Fabry-Pérot</i>
$L_{\text{extensómetro}}$	Comprimento do extensómetro <i>Fabry-Pérot</i>
$L_s$	Comprimento entre cunhas do fio de pré-esforço usado no ensaio realizado no DEMI
$L_{s_0}$	Comprimento entre cunhas do fio de pré-esforço usado no ensaio realizado no DEMI para um estado de tensão nula
$L_t$	Comprimento total do fio de pré-esforço usado no ensaio realizado no DEMI
$L_{t_0}$	Comprimento total do fio de pré-esforço usado no ensaio realizado no DEMI para um estado de tensão nula
$L_{t_\sigma}$	Comprimento total do fio de pré-esforço usado no ensaio realizado no DEMI para um estado de tensão não nula
$L_u$	Comprimento fora das cunhas do fio de pré-esforço usado no ensaio realizado no DEMI
$M_{Rd}$	Momento flector resistente
$n$	Índice de refacção
$n_1$	Índice de refacção do núcleo de um cabo de fibra óptica
$n_2$	Índice de refacção do revestimento de um cabo de fibra óptica
$R$	Resistência eléctrica
$R_0$	Resistência eléctrica inicial
$R_1$	Resistência do braço 1 da ponte de <i>Wheatstone</i>
$R1$	Reflexão de referência
$R_2$	Resistência do braço 2 da ponte de <i>Wheatstone</i>
$R2$	Reflexão de medição
$R_3$	Resistência do braço 3 da ponte de <i>Wheatstone</i>
$R_4$	Resistência do braço 4 da ponte de <i>Wheatstone</i>
$R_{L1}$	Resistência eléctrica do primeiro fio condutor usado numa montagem a três fios
$R_{L2}$	Resistência eléctrica do segundo fio condutor usado numa montagem a três fios
$R_{L3}$	Resistência eléctrica do terceiro fio condutor usado numa montagem a três fios
$T$	Temperatura
$T_{\text{laser}}$	Tempo de resposta do laser
$U$	Tensão eléctrica/Diferença de potencial
$U_0$	Tensão eléctrica medida pelo sensor elastomagnético sem o material ferromagnético

---

$U_A$	Diferença de potencial entre os pontos 1 e 4 da ponte de <i>Wheatstone</i>
$U_E$	Diferença de potencial entre os pontos 2 e 3 da ponte de <i>Wheatstone</i>
$U_{out}$	Tensão eléctrica medida pelo sensor elastomagnético com o material ferromagnético
$V_0$	Velocidade longitudinal de uma onda ultra-sonora para um estado de tensão nula
$V_{experimental}$	Velocidade longitudinal do som obtida experimentalmente
$V_L$	Velocidade longitudinal de uma onda ultra-sonora
$V_{Rd}$	Esforço transversal resistente
$V_{teórico}$	Velocidade longitudinal teórica do som
$V_\sigma$	Velocidade longitudinal de uma onda ultra-sonora para um estado de tensão não nula
$w$	Massa distribuída



## LISTA DE LETRAS GREGAS

$\alpha$	Coeficiente de expansão térmica linear
$\Delta L$	Variação de comprimento
$\Delta L_1$	Diferença do caminho óptico entre os espelhos do primeiro interferómetro de <i>Michelson</i>
$\Delta L_2$	Diferença do caminho óptico entre os espelhos do segundo interferómetro de <i>Michelson</i>
$\Delta R$	Variação de resistência eléctrica
$\Delta T$	Variação de temperatura
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\varepsilon$	Extensão
$\theta$	Ângulo de incidência
$\lambda$	Comprimento de onda
$\Lambda$	Espaçamento da rede de Bragg
$\mu_0$	Permeabilidade no vácuo
$\mu_m$	Permeabilidade de um material ferromagnético
$\mu_r$	Permeabilidade relativa
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\rho$	Massa volúmica
$\rho$	Resistividade eléctrica
$\sigma$	Tensão
$\phi$	Diâmetro
$\Psi$	Ângulo de inclinação





## LISTA DE ACRÓNIMOS

BG	Rede de Bragg ( <i>Bragg Grating</i> )
CFRP	Fibra de carbono ( <i>Carbon Fiber-Reinforced Polymer</i> )
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DEE	Departamento de Engenharia Electrotécnica
DEMEC	Extensómetro Mecânico Desmontável ( <i>Demountable Mechanical Strain Gauge</i> )
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EMAT	Transdutor Acústico Electromagnético ( <i>Electromagnetic Acoustic Transducer</i> )
FFT	Transformada Rápida de Fourier ( <i>Fast Fourier Transform</i> )
LED	Diodo Emissor de Luz ( <i>Light-Emitting Diode</i> )
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
PMMA	Polimetil-metacrilato ( <i>Polymethyl Methacrylate</i> )
RHS	Secção Rectangular Oca ( <i>Rectangular Hollow Section</i> )
SOFO	Monitorização de Estruturas com Fibra Óptica ( <i>Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques</i> )
TOFD	<i>Time-of-Flight Diffraction</i>



# 1 INTRODUÇÃO

Actualmente não existe nenhum método experimental não destrutivo que permita quantificar o pré-esforço efectivamente instalado em estruturas existentes [46].

Existem, sim, vários dispositivos utilizados na monitorização de estruturas de Engenharia Civil para calcular extensões e, consequentemente, as tensões instaladas nessas estruturas. Porém, de forma a quantificar o pré-esforço instalado nas referidas estruturas, é necessário que os dispositivos usados para o efeito sejam instalados durante a sua fase de construção. Neste grupo de dispositivos englobam-se os extensómetros eléctricos de resistência, os extensómetros de corda vibrante, os extensómetros de fibra óptica e os sensores elastomagnéticos.

Vários trabalhos de investigação foram realizados no sentido de tentar encontrar uma solução para o problema atrás referido. Merecem especial relevância os trabalhos de *Chaki e Bourse* [3], assim como os de *Washer, Green e Pond Jr.* [46]. Todos estes autores tiraram partido do efeito acustoelástico de ondas ultra-sonoras para obter curvas de calibração de fios e cordões de pré-esforço que relacionam a variação da velocidade de propagação dessas ondas com o pré-esforço aplicado. Apesar de os ensaios experimentais terem tido sucesso, os métodos propostos pelos mesmos autores ainda se encontram numa fase inicial de desenvolvimento, não podendo, de momento, ser aplicados em situações práticas.

## 1.1 Processo de fabrico de elementos pré-tensionados

### 1.1.1 Posicionamento dos fios de pré-esforço

No processo de fabricação de elementos pré-tensionados, os fios de pré-esforço são, primeiramente, colocados numas miras aparafusadas à pista de modo que fiquem posicionados correctamente (ver Figura 1.1). Nesta fase, os fios de aço ainda se encontram enrolados, estando armazenados em várias cavidades existentes no pavimento da fábrica, nas imediações de uma das extremidades da pista (ver Figura 1.2).



**Figura 1.1 - Mira de posicionamento dos fios de pré-esforço**



**Figura 1.2 - Armazenamento dos fios de pré-esforço**

Seguidamente, estes são fixados numa das suas pontas por um sistema de cunhas, a um veículo que os desenrola à medida que o mesmo se desloca ao longo da pista (ver Figura 1.3). Quando o veículo termina o seu percurso, os fios desenrolados são posicionados noutra mira, idêntica à primeira, e presos pelo mesmo sistema de cunhas a uma barra de aço embutida no pavimento (ver Figura 1.4). No ponto de partida do veículo, os fios de aço são cortados e fixados da mesma maneira que na extremidade oposta (ver Figura 1.5).



Figura 1.3 - Fixação dos fios de pré-esforço ao veículo de transporte

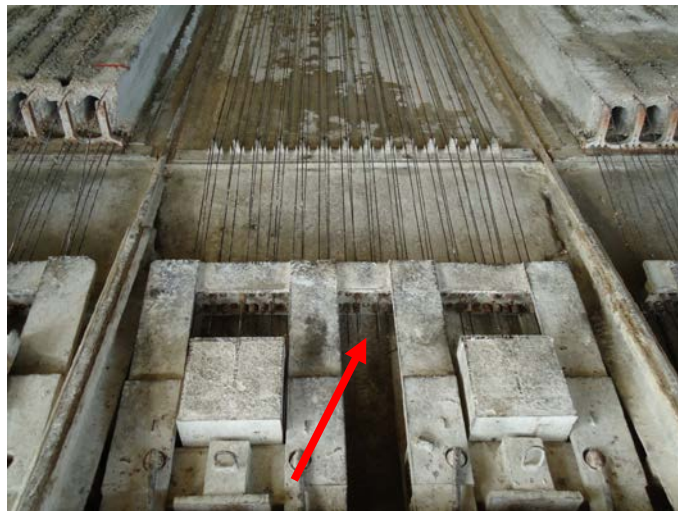


Figura 1.4 - Fixação dos fios de pré-esforço no ponto de chegada do veículo



Figura 1.5 - Fixação dos fios de pré-esforço no ponto de partida do veículo

### 1.1.2 Tensionamento dos fios de pré-esforço

O pré-esforço é aplicado individualmente a cada fio, numa das extremidades da pista, com recurso a um macaco hidráulico. Na extremidade do êmbolo do macaco existe uma peça em aço que permite passar um fio de pré-esforço e sobre a qual se encosta um cilindro com cunhas cónicas para o prender, permitindo, assim, o seu tensionamento. Imediatamente a seguir a essa peça de aço encontra-se outro cilindro com cunhas que serve para fixar o fio de pré-esforço, depois de este ser traccionado, à barra de aço que se encontra embutida no chão da pista (ver Figura 1.6).



Figura 1.6 - Tensionamento dos fios de pré-esforço

### 1.1.3 Betonagem

A betonagem é feita com recurso a um veículo que percorre a pista da fábrica, de uma ponta à outra, largando o betão à medida que se desloca. Este veículo possui um recipiente para onde o betão é despejado com recurso a um balde suspenso por um pórtico rolante (ver Figura 1.7). Por sua vez, o balde é abastecido na central de produção do betão, situada no exterior do pavilhão. Esse balde tem acesso ao pavilhão através de uma das suas entradas. Na parte inferior deste veículo encontra-se um molde em aço que confere a forma aos elementos a serem betonados (ver Figura 1.8). Após a cura do betão, os elementos pré-fabricados são seccionados de acordo com as especificações do cliente.





**Figura 1.7 - Veículo de betonagem e balde de descarga**



**Figura 1.8 - Molde em aço dos elementos a serem betonados**

## 1.2 Objectivo da dissertação

A presente dissertação tem como objectivo desenvolver um sistema que permita quantificar o pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados. Nesse sentido, foram realizados quatro grupos de ensaios experimentais em fios de pré-esforço com 5,0 mm de diâmetro, utilizados no fabrico de perfis I20 pela empresa Secil Prebetão.

No primeiro grupo de ensaios experimentou-se estabelecer uma relação entre a variação da resistência eléctrica de um fio de pré-esforço com 1,2 m de comprimento e a força de tensionamento que lhe é aplicada.

No segundo grupo de ensaios tentou-se estabelecer uma relação entre a variação da velocidade de propagação de ondas ultra-sonoras e o valor da força de tracção aplicada a um fio de pré-esforço idêntico ao anterior.

No terceiro grupo de ensaios determinou-se a força instalada num fio de pré-esforço com 2,5 m de comprimento, por medição da sua frequência de vibração fundamental. Utilizou-se, para

esse efeito, o equipamento de medição comercial *Digiforce* [1], um laser e um acelerómetro. Nos testes realizados com o *Digiforce* [1] foram testados três sistemas para limitar o comprimento do fio utilizado com o intuito de implementá-los, posteriormente, nos fios pré-esforçados na pista da fábrica da Secil Prebetão que possuem comprimentos muito superiores.

### 1.3 Organização da dissertação

No capítulo um faz-se uma breve introdução ao tema da dissertação e ao processo de fabrico de elementos pré-tensionados. Seguidamente, são mencionados os objectivos deste tema, os métodos utilizados para os atingir e é referida, ainda, a organização do trabalho.

No capítulo dois é apresentado um leque variado de sistemas que são correntemente utilizados para quantificar extensões e, consequentemente, tensões em estruturas de Engenharia Civil. É apresentado, também, o trabalho de *Chaki e Bourse* [3] que serviu de base para o terceiro grupo de ensaios experimentais e é referido, ainda, o trabalho de *Washer, Green e Pond Jr.* [46]

No capítulo três introduz-se o primeiro grupo de ensaios experimentais, começando-se por explicar a metodologia adoptada para a sua realização. No fim é feita uma análise dos resultados obtidos.

No capítulo quatro é apenas indicado o objectivo e o procedimento experimental para o segundo grupo de ensaios, uma vez que não foi possível concretizá-lo devido à avaria do equipamento de ultra-sons.

No capítulo cinco introduz-se o terceiro grupo de ensaios experimentais, começando-se por explicar a metodologia adoptada para a execução dos testes realizados com o *Digiforce* [1], seguindo-se a análise dos resultados obtidos dos ensaios laboratoriais e dos ensaios executados na fábrica da Secil Prébetão. Na segunda metade deste capítulo são descritos os ensaios experimentais realizados com o laser e com o acelerómetro, fazendo-se, de seguida, a respectiva análise e comparação dos resultados obtidos por cada um dos dois aparelhos.

No capítulo seis são tecidas as principais conclusões acerca dos três métodos experimentais acima mencionados e é apresentada uma proposta para desenvolvimentos futuros.



## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Especificação LNEC E440-1995

Actualmente, existe um método destrutivo utilizado para determinar o pré-esforço instalado nas armaduras de pré-esforço de vigotas pré-fabricadas de betão pré-esforçado para pavimentos aligeirados, de acordo com a Especificação LNEC E 440-1995 [10].

Primeiramente, são abertos dois roços por cada fio de pré-esforço, distanciados aproximadamente de 0,25 m, de modo a que este fique exposto. Seguidamente são marcados dois pontos nesse fio com um martelo e um punção de bico (um ponto por cada roço).

A distância entre estes dois pontos é medida com um alongâmetro antes de se cortar o fio de pré-esforço, com recurso a uma tesoura, pelo menos 0,15 m para cada lado exterior dos pontos marcados.

Usando uma máquina de ensaio universal tracciona-se o fio de pré-esforço até se registar no alongâmetro uma leitura idêntica àquela que foi tirada com o fio dentro do betão. Conhecendo-se a força de tracção necessária para repor o comprimento original do fio, consegue-se determinar a tensão correspondente, através da Equação (2.1)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

onde  $\sigma$  é a tensão no fio de pré-esforço,  $F$  é a força de tracção aplicada pela máquina de ensaio e  $A$  é a área da secção transversal do fio de pré-esforço.

### 2.2 Extensómetros eléctricos de resistência

Os extensómetros eléctricos de resistência são dispositivos utilizados para medir extensões em função da variação linear da sua resistência eléctrica.

A Equação (2.2) rege o funcionamento deste tipo de extensómetros

$$\frac{\Delta R}{R} = G \times \varepsilon \quad (2.2)$$

onde,  $\Delta R/R$  representa a variação unitária da resistência eléctrica,  $G$  o factor do extensómetro e  $\varepsilon$  a extensão sofrida.

O factor do extensómetro, também denominado de factor de sensibilidade, é um parâmetro que traduz a sensibilidade do extensómetro em variar a sua resistência eléctrica face às deformações que lhe são impostas [28].

### 2.2.1 Tipos de extensómetros eléctricos de resistência

Existem três tipos de extensómetros eléctricos, designadamente os extensómetros de fio de secção circular dispostos em forma de grelha, os extensómetros peliculares e os extensómetros de semicondutores.

Actualmente, os extensómetros peliculares são os mais utilizados em aplicações correntes. O seu processo de fabrico consiste em imprimir um circuito, em forma de grelha, numa película condutora muito fina [11]. A grelha encontra-se ligada a um material de base que, por sua vez, é colado sobre a superfície de um espécime de teste (e.g. fio de pré-esforço). Deste modo, as extensões sofridas por este espécime são directamente transmitidas ao extensómetro (ver Figura 2.1). O padrão em grelha é utilizado para maximizar a quantidade de película sujeita a extensões longitudinais e para minimizar, simultaneamente, a sua secção transversal de modo a reduzir as extensões transversais resultantes do efeito de Poisson.

Aplicando directamente a lei de *Hooke*, dada pela Equação (2.3), consegue-se obter a tensão no fio de pré-esforço e, conseqüentemente, a força de pré-esforço aplicada.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.3)$$

$E$  representa o módulo de elasticidade do fio de pré-esforço,  $\sigma$  é a tensão instalada e  $\epsilon$  é a extensão sofrida pelo fio.

Geralmente, é usada uma película metálica no fabrico destes extensómetros com um factor de sensibilidade aproximadamente igual a dois. São comercializados extensómetros peliculares cujos valores de resistência nominal variam entre os 30Ω e 3000Ω. Os valores mais comuns são, no entanto, de 120Ω, 350Ω e 1000Ω [28].

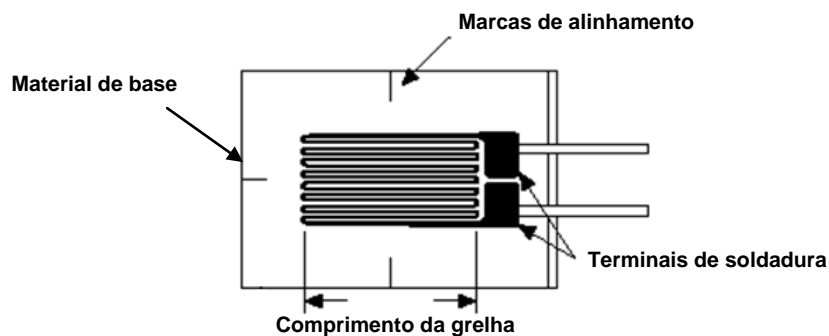


Figura 2.1 - Extensómetro pelicular [28]

### 2.2.2 Geometria dos extensómetros

Quando se pretende medir a extensão num dado ponto e numa dada direcção, recorre-se, habitualmente, a um extensómetro pelicular como o que se encontra ilustrado na Figura 2.1. A grelha é orientada segundo a direcção das extensões pretendidas.

No caso de se querer conhecer as extensões num ponto sujeito a um estado plano de tensão, utilizam-se, para esse efeito, rosetas planas de extensómetros que podem tomar variadas formas. As

configurações mais frequentes são a roseta rectangular, ilustrada na Figura 2.2, e a roseta triangular, representada na Figura 2.3 [12], [35].

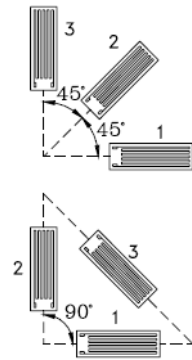


Figura 2.2- Rosetas rectangulares [35]

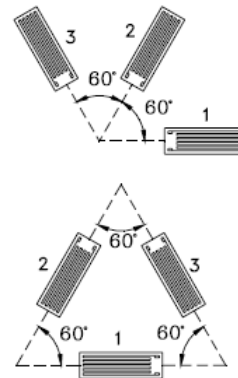


Figura 2.3 - Rosetas triangulares [35]

### 2.2.3 Outros tipos de extensómetros

#### 2.2.3.1 Célula de carga

Uma célula de carga é composta por um cilindro de aço que, por sua vez, possui vários extensómetros posicionados no seu interior. Quando são aplicadas forças de tracção ou de compressão ao cilindro, este deforma-se e as extensões por ele sofridas são registadas pelos extensómetros (ver Figura 2.4) [40].

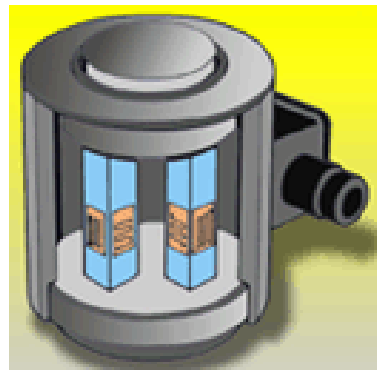


Figura 2.4 - Célula de carga [40]

#### 2.2.3.2 Extensómetros mecânicos

Existem vários tipos de extensómetros mecânicos como, por exemplo, o que se encontra representado na Figura 2.5. Este sistema é composto por uma chapa de aço flexível em forma de arco com extensómetros colocados no seu vértice. A chapa é fixada na superfície de um elemento ou de uma estrutura. Quando esse elemento ou estrutura se deforma, a chapa de aço acompanha as suas deformações, as quais são registadas pelos extensómetros [44].



**Figura 2.5 - Extensómetro mecânico "PI" [44]**

Outro exemplo de um extensómetro mecânico é o sistema *DEMEC* (ver Figura 2.6) que é composto por um deflectómetro montado sobre uma barra de aço com dois apoios cónicos em que um dos apoios é fixo e o outro é móvel. Estes apoios são inseridos em dois discos metálicos previamente fixados à superfície de um dado elemento ou de uma dada estrutura. Quaisquer deformações sofridas por esse elemento ou estrutura traduzem-se num afastamento dos apoios cónicos que é registado no deflectómetro [47].



**Figura 2.6 - Extensómetro mecânico *DEMEC* [47]**

Por último, apresenta-se um tipo de extensómetro mecânico utilizado nas prensas hidráulicas *Zwick* [49]. Este é composto por dois braços com uma tenaz na sua extremidade. Cada um dos braços encontra-se preso a um apoio fixo e ambos estão ligados a um sensor de deslocamentos. Na Figura 2.7 pode-se ver o funcionamento deste sistema num ensaio à tracção para um dado espécime. As tenazes são apertadas contra o material de teste, permitindo, desta forma, que os braços acompanhem a deformação do mesmo à medida que a força de tracção, aplicada pela prensa, aumenta. O sensor regista a posição de cada um dos braços, dando, ao longo do ensaio, o

deslocamento total entre eles. Subtraindo a distância inicial entre os braços à distância total em cada instante do ensaio, consegue-se obter o alongamento sofrido pelo espécime utilizado.

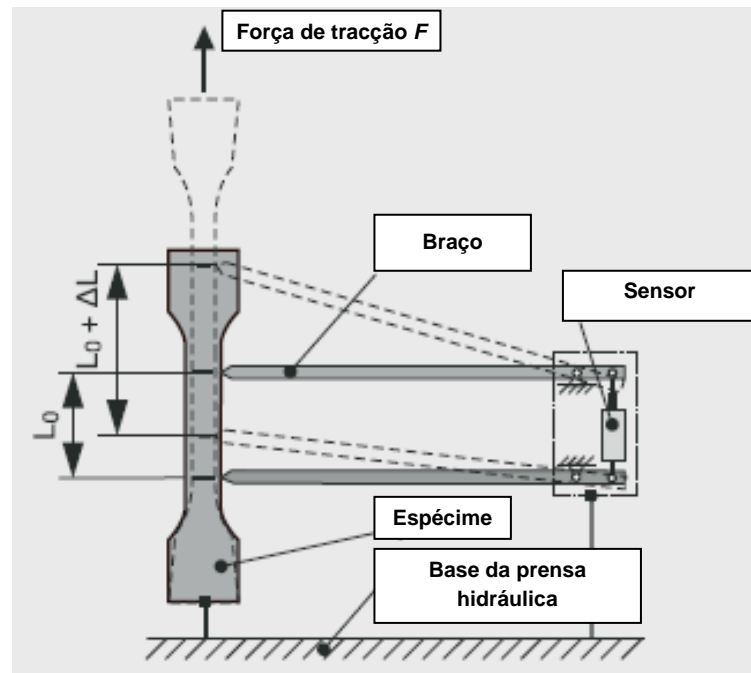


Figura 2.7 - Extensômetro mecânico Zwick [49]

#### 2.2.4 Medição de extensões com uma ponte de Wheatstone

As extensões de um extensômetro podem ser obtidas medindo-se a variação da sua resistência eléctrica através de uma ponte de *Wheatstone*, esquematizada na Figura 2.8. Esta é constituída por quatro resistências,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , ligadas entre si, formando um circuito fechado.

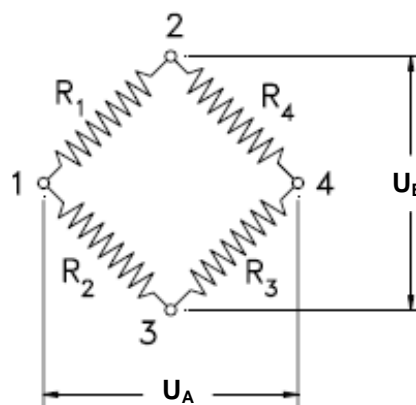


Figura 2.8- Esquema de uma ponte de *Wheatstone* [35]

Os pontos 2 e 3 são ligados a uma fonte externa de energia eléctrica, criando-se entre eles uma diferença de potencial  $U_E$  cujo valor é conhecido. Essa diferença de potencial  $U_E$  irá dar origem a

outra diferença de potencial  $U_A$ , entre os pontos 1 e 4, cujo valor é dependente da razão entre as resistências  $R_1/R_2$  e  $R_4/R_3$ , de acordo com a Equação (2.4).

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 \times R_3 - R_2 \times R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2.4)$$

A ponte de *Wheatstone* encontra-se equilibrada quando  $U_A / U_E$  é igual a zero, ou seja, quando  $U_A$  é igual a zero, uma vez que  $U_E$  é diferente de zero. Portanto, no equilíbrio, o produto das resistências de braços opostos, é igual. De acordo com a Equação (2.5), obtém-se:

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4 \quad (2.5)$$

Aplicando logaritmos à equação anterior e diferenciando, obtêm-se as Equações (2.6) e (2.7), respectivamente.

$$\log R_1 + \log R_3 = \log R_2 + \log R_4 \quad (2.6)$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0 \quad (2.7)$$

Pode-se concluir da Equação (2.7) que as variações unitárias de resistência em braços adjacentes da ponte de *Wheatstone* subtraem-se (e.g.  $R_1$  e  $R_2$ ) e que as variações unitárias de resistências em braços opostos somam-se (e.g.  $R_1$  e  $R_3$ ).

Admitindo-se que a variação de resistência registada  $\Delta R_i$  é menor do que a própria resistência  $R_i$  (o que, geralmente, é verificado), a Equação (2.4) pode ser reescrita sob a forma da Equação (2.8) [12], [35].

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.8)$$

#### 2.2.4.1 Ligação dos extensómetros

Quando se estabelece a ligação dos extensómetros à ponte de *Wheatstone*, existem três formas de o fazer, conhecidas como: um quarto de ponte, meia ponte e ponte completa. Cada uma delas está directamente relacionada com o número de extensómetros utilizados, correspondendo, respectivamente, a um, dois e quatro extensómetros. Os extensómetros, por sua vez, correspondem às resistências da ponte de *Wheatstone* que estão sujeitas a deformações, enquanto que as outras resistências, necessárias para fechar o circuito, não sofrem quaisquer deformações [35]. A Figura 2.9 esquematiza as diferentes ligações mencionadas.

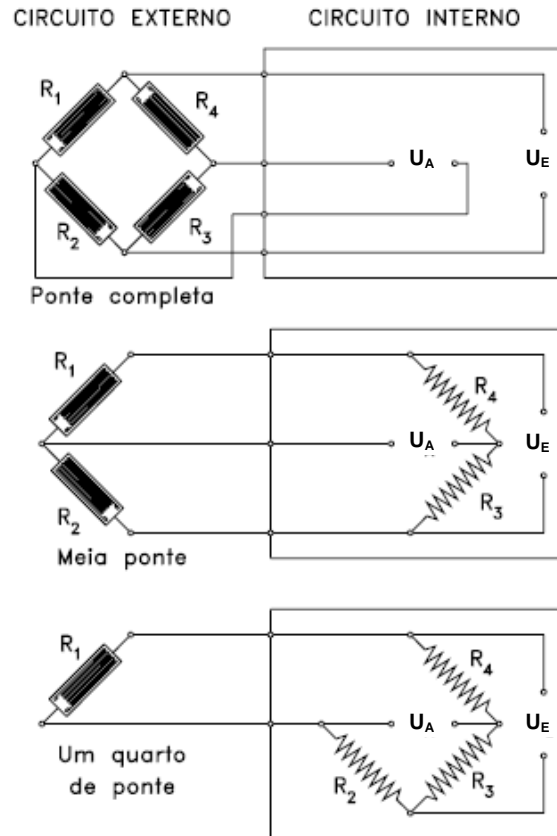


Figura 2.9 - Tipo de ligações à ponte de *Wheatstone* [35]

#### 2.2.4.2 Modos de actuação dos extensómetros

Os extensómetros ligados aos braços de uma ponte de *Wheatstone*, por intermédio de fios condutores, podem ser activos ou compensadores. Os extensómetros activos são utilizados para medir as deformações de um objecto em análise, deformações essas que resultam de esforços e, também, da variação de temperatura. Por outro lado, os extensómetros compensadores são apenas utilizados para medir as deformações de origem térmica num material idêntico ao objecto em análise, sujeito à mesma temperatura.

Com o objectivo de minimizar os erros de leitura provenientes da variação de temperatura, utiliza-se, frequentemente, um extensómetro activo e um extensómetro compensador montados no mesmo circuito. Como a expansão térmica afecta de igual modo os dois extensómetros, uma vez que estão montados em materiais idênticos, deve-se ligar o extensómetro activo e o extensómetro compensador em braços adjacentes da ponte de *Wheatstone*, para que os efeitos da temperatura se anulem, visto que as variações unitárias de resistência em braços adjacentes subtraem-se algebricamente [12].

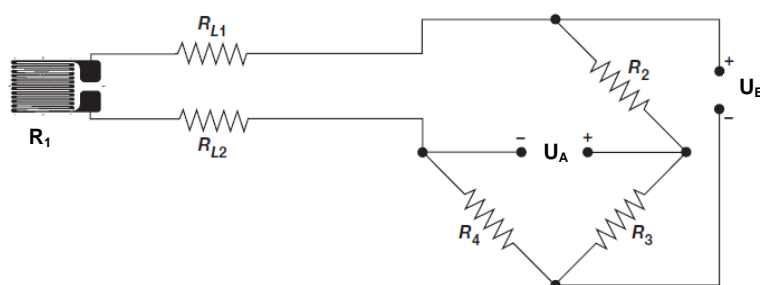
#### 2.2.4.3 Resistência dos fios condutores

Até agora, tem-se desprezado a resistência dos fios condutores utilizados para ligar os extensómetros à ponte de *Wheatstone*. Tome-se, como exemplo, a Figura 2.10 onde um extensómetro é ligado em um quarto de ponte numa montagem a dois fios. Pode-se constatar que a

resistência do braço da ponte onde o extensômetro foi ligado, é igual à soma da resistência do próprio extensômetro,  $R_1$ , com as resistências dos dois fios condutores,  $R_{L1}$  e  $R_{L2}$ , montadas em série. Esta situação tanto pode gerar um ligeiro desequilíbrio inicial da ponte de *Wheatstone*, como pode introduzir um valor de resistência inicial elevado, traduzindo-se numa extensão inicial elevada que limita, à partida, a gama de extensões disponíveis de serem medidas pelo aparelho.

Os fios condutores também introduzem resistências parasitas no extensômetro, diminuindo-lhe o factor de sensibilidade. Se a resistência dos fios condutores for demasiado elevada em comparação com a resistência do extensômetro, pode ocorrer a sua dessensibilização total.

Finalmente, a variação da temperatura dos fios condutores durante o processo de medição de extensões com a ponte de *Wheatstone*, constitui outra fonte de erro.



**Figura 2.10 - Montagem a dois fios de um extensômetro em um quarto de ponte [15]**

Para atenuar os problemas acima referidos, é frequente utilizar-se uma montagem a três fios, exemplificada na Figura 2.11. Nesta configuração, a resistência do primeiro fio condutor,  $R_{L1}$ , e a resistência do extensômetro,  $R_1$ , constituem um braço da ponte. Analogamente, a resistência do segundo fio condutor,  $R_{L2}$ , e a resistência do extensômetro,  $R_4$ , constituem o braço adjacente ao anterior. Se os fios condutores  $R_{L1}$  e  $R_{L2}$  possuírem o mesmo comprimento e forem do mesmo material, a sua resistência inicial será igual e, conseqüentemente, a resistência dos dois braços atrás mencionados, também. Deste modo, consegue-se atingir o equilíbrio da ponte de *Wheatstone* e anular os efeitos da temperatura nos fios condutores, uma vez que estes se encontram em braços adjacentes da ponte. A dessensibilização do extensômetro é reduzida para metade em relação à situação onde se usou uma montagem a dois fios, visto que, agora, apenas um fio condutor está ligado em série com o extensômetro. O terceiro fio condutor,  $R_{L3}$ , é apenas utilizado para medir a diferença de potencial resultante da deformação do extensômetro. Como este fio não se encontra em série com nenhum dos braços da ponte, não interfere com o seu equilíbrio e não introduz erros devido à variação de temperatura [15].



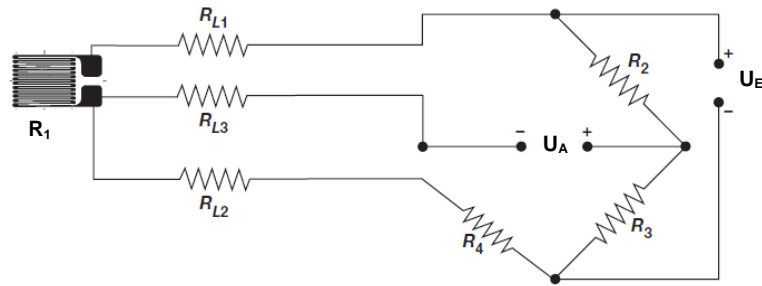


Figura 2.11 - Montagem a três fios de um extensómetro em um quarto de ponte [15]

## 2.3 Extensómetros acústicos

Os extensómetros acústicos funcionam com base no princípio da vibração de uma corda tensionada, de comprimento  $L$ , no modo de vibração fundamental, que se encontra fixa nas duas extremidades (ver Figura 2.12) [29].

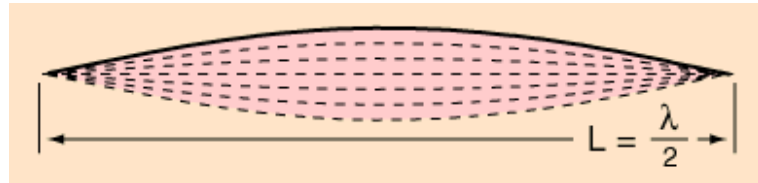


Figura 2.12 - Primeiro modo de vibração de uma corda tensionada [29]

A frequência de vibração fundamental,  $f$ , é dada pela razão entre a velocidade de propagação de uma onda sonora na corda,  $V$ , e o respectivo comprimento de onda,  $\lambda$ , segundo a Equação (2.9).

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (2.9)$$

A velocidade de propagação da onda sonora relaciona-se com a força de tracção instalada na corda pela Equação (2.10)

$$V = \sqrt{\frac{F}{w}} \quad (2.10)$$

onde,  $F$  é a força de tracção na corda, e  $w$  é a massa distribuída da corda, dada pelo quociente  $m/L$ .

Substituindo a expressão anterior na Equação (2.9) e sabendo que, no modo fundamental, o comprimento de onda é igual ao dobro do comprimento da corda, a frequência de vibração fundamental é dada, então, pela Equação (2.11).

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{w}} \quad (2.11)$$

### 2.3.1 Extensómetros de corda vibrante

O extensómetro de corda vibrante é constituído por um fio metálico tensionado que se encontra preso nas suas extremidades, e por um electroíman posicionado a meio vão e suficientemente afastado de modo a permitir a livre vibração do fio metálico. Os pontos de fixação

deste fio estão em contacto com o objecto sob análise. À medida que o material de teste se deforma, estes pontos movem-se em relação à sua posição inicial, alterando a tensão previamente instalada no fio metálico e, consequentemente, a sua frequência de vibração. Quando é passada uma corrente eléctrica pela bobine do electroímã, são induzidas vibrações no fio metálico com uma determinada frequência. Estas vibrações irão, por sua vez, induzir uma corrente alterna na bobine com uma frequência idêntica. Por fim, a frequência da corrente alterna captada pela bobine, é convertida em extensões com o auxílio de um aparelho de leitura [14].

A força de tracção no fio relaciona-se com as extensões por ele sofridas através da Equação (2.12)

$$F = \varepsilon EA \quad (2.12)$$

onde,  $\varepsilon$  é a extensão,  $E$  é o módulo de elasticidade do fio e  $A$  é a área da sua secção transversal.

A massa distribuída do fio pode ser expressa de acordo com a Equação (2.13)

$$w = \rho A \quad (2.13)$$

sendo  $\rho$  a massa volúmica do fio.

Substituindo as duas expressões anteriores na Equação (2.11) e resolvendo-a em ordem a  $\varepsilon$ , obtém a Equação (2.14) que permite calcular o valor das extensões em função da frequência de vibração fundamental.

$$\varepsilon = \frac{4L^2\rho}{E} f^2 \quad (2.14)$$

### 2.3.2 Digiforce

O *Digiforce* [1] é um aparelho portátil concebido para medir a força de tracção instalada em fios, cordões, cabos e barras de pré-esforço com comprimentos compreendidos entre 1,0 m e 10,0 m (ver Figura 2.13).



Figura 2.13 – *Digiforce* [1] e respectivo martelo de aço

O equipamento possui na sua extremidade um sensor electromagnético que converte as vibrações de um material ferroso em tensões eléctricas que são posteriormente analisadas, obtendo-

se, assim, a sua frequência de vibração fundamental. Caso se trate de um elemento não ferroso, prende-se um clipe metálico ao mesmo.

É usado um martelo de aço cilíndrico para atingir o elemento sob tensão, provocando a sua vibração. Seguidamente, aproxima-se o sensor do aparelho ao espécime sem que ambos entrem em contacto. As frequências captadas são processadas, criando-se, primeiro, um intervalo de tolerância que é, depois, utilizado para validar as restantes oscilações. Cada oscilação é, então, comparada com a gama admissível de frequências, efectuando-se, no fim, a média dos valores que caem dentro do intervalo estabelecido para calcular a frequência de vibração fundamental.

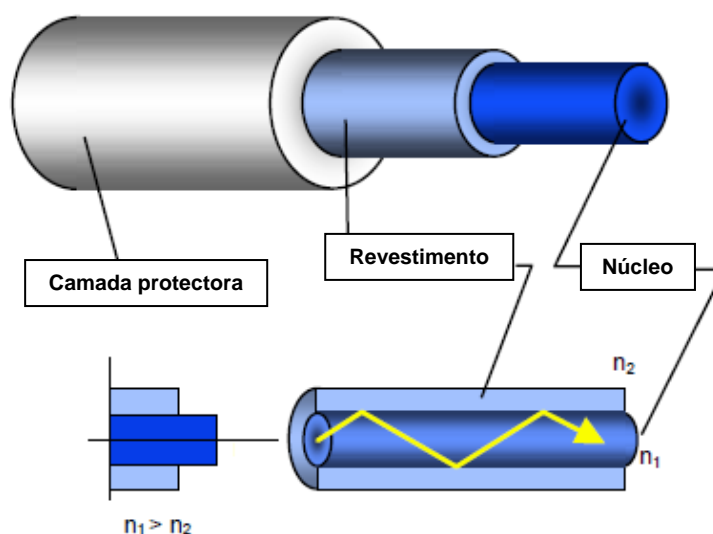
Reescrevendo a Equação (2.11) em ordem a  $F$ , obtém-se a Equação (2.15) que permite calcular directamente a força de tracção instalada num dado elemento.

$$F = 4L^2wf^2 \quad (2.15)$$

## 2.4 Extensómetros de fibra óptica

Tipicamente, um cabo de fibra óptica é constituído por uma fibra de vidro (núcleo) envolvida por um revestimento. Tanto um como o outro são feitos de sílica, mas com índices de refração<sup>1</sup> diferentes. O índice de refração do núcleo,  $n_1$ , é superior ao índice de refração do revestimento,  $n_2$ . Por fim, uma camada protectora de um material elastomérico, é usada para cobrir o revestimento, conferindo ao cabo resistência e protecção mecânica.

A fibra óptica funciona como um guia de onda que permite transmitir ondas electromagnéticas no domínio do visível (i.e. luz) a grandes velocidades e em distâncias consideráveis com uma perda relativamente pequena de sinal. A luz propaga-se na fibra óptica por meio de reflexões internas na interface núcleo/revestimento [4], [6], [8]. Na Figura 2.14 encontram-se esquematizados os vários elementos que constituem um cabo de fibra óptica, assim como o mecanismo de propagação da luz no seu interior.



**Figura 2.14 – Constituição de uma fibra óptica e propagação da luz no seu interior [4]**

<sup>1</sup> Índice de refração: Quociente entre a velocidade de propagação da luz no vácuo e a velocidade de propagação da luz num dado meio [47]

Nesta secção serão apresentados quatro tipos de extensómetros de fibra óptica correntemente utilizados em aplicações de Engenharia Civil (ver Figura 2.15) [8]:

- Sensores interferométricos de Fabry-Pérot ou sensores pontuais: permitem efectuar medições apenas num ponto, tipicamente na extremidade do cabo de fibra óptica;
- Sensores de fibra óptica com redes de Bragg ou sensores quase distribuídos: permitem tirar extensões em vários pontos de um cabo de fibra óptica;
- Sensores interferométricos SOFO ou de base longa: permitem adquirir valores de deformações ao longo de um comprimento considerável;
- Sensores distribuídos de dispersão de Raman e de dispersão de Brillouin: permitem a aquisição de dados em qualquer ponto da fibra óptica, geralmente a cada metro ou a cada quilómetro.

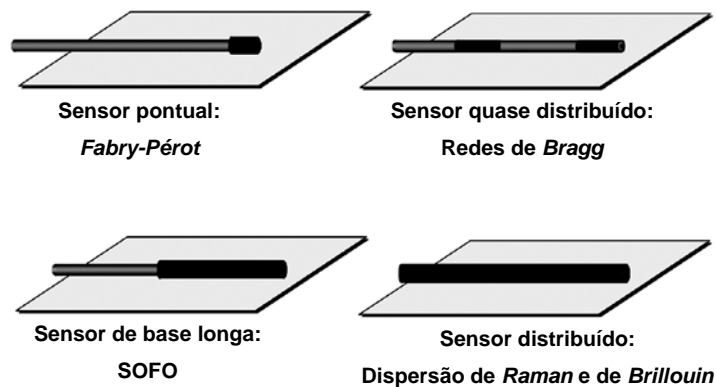


Figura 2.15 - Tipos de sensores de fibra óptica [8]

#### 2.4.1 Sensores interferométricos de Fabry-Pérot

O sensor é composto por dois espelhos paralelos, feitos de uma camada semi-reflectora, colocados nas extremidades de duas fibras ópticas, de modo a que fiquem voltados um para o outro. Uma das fibras é utilizada para a propagação do feixe de luz emitido, enquanto que a outra é apenas uma fibra reflectora. Estas duas fibras, por sua vez, são fixadas pontualmente a um tubo capilar de vidro. A distância entre pontos de fixação constitui o comprimento do extensómetro, variando, geralmente, entre 3 - 10 mm ( $L_{\text{extensómetro}}$ ). Os espelhos encontram-se separados por uma fina camada de ar, conhecida por cavidade de Fabry-Pérot, cujo comprimento ( $L_{\text{cavidade}}$ ) é da ordem de alguns micrones. Na Figura 2.16 encontra-se esquematizada a constituição deste sensor e são mostrados, também, os vários componentes do sistema de medição [4], [34], [27].

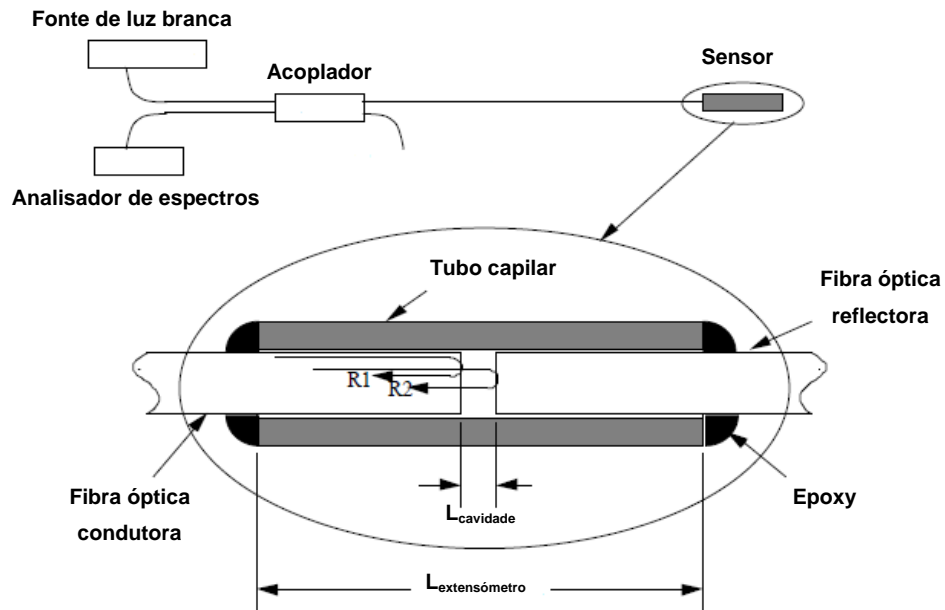


Figura 2.16 - Constituição de um sensor de *Fabry-Pérot* [27]

#### 2.4.1.1 Modo de funcionamento

Um feixe de luz branca emitido por um *LED* é dividido em duas partes num acoplador: uma metade é injectada na fibra óptica condutora e a outra metade é perdida. O feixe propaga-se no interior da fibra condutora até atingir o primeiro espelho que se encontra colocado na sua extremidade. Quando tal acontece, cerca de 4% da luz é parcialmente reflectida (*R1*) e a restante porção é transmitida para a cavidade de *Fabry-Pérot*. A luz transmitida percorre a cavidade de ar até ser reflectida no segundo espelho (*R2*), colocado na extremidade da fibra reflectora. Esta regressa, então, em direcção ao primeiro espelho, reentrando na fibra óptica condutora. A primeira reflexão, *R1*, é a reflexão de referência e a segunda reflexão, *R2*, é a reflexão de medição que introduz um desfasamento em relação a *R1* por ter percorrido a cavidade de *Fabry-Pérot* duas vezes.

As duas ondas reflectidas sobrepõem-se, interferindo construtivamente ou destrutivamente, e viajam de novo em direcção ao acoplador onde são separadas, outra vez, em duas partes. Uma metade é perdida e a outra é encaminhada para um analisador de espectros.

Uma vez que a luz é composta por vários comprimentos de onda, ocorrem interferências construtivas entre comprimentos de onda da luz reflectida no segundo espelho, *R2*, que estejam desfasados de  $2\pi$  dos comprimentos de onda da luz reflectida no primeiro espelho, *R1*. Assim, o comprimento absoluto da cavidade pode ser determinado através da Equação (2.16)

$$L_{cavidade} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (2.16)$$

onde,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são comprimentos de onda desfasados de  $2\pi$ .

Consequentemente, as deformações sofridas pelo extensómetros podem ser obtidas pela Equação (2.17) [13], [34], [27].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{cavidade}}{L_{extensómetro}} \quad (2.17)$$

### 2.4.1.2 Aplicações em engenharia civil

A ponte *Liaohé*, localizada na China, pertence a um conjunto de pontes que integram a linha ferroviária que liga *Qinghuangdao* a *Shengyang*, possuindo 2433,59 m de comprimento e 32 m de largura. Durante a sua fase de construção foram implementados sensores interferométricos de *Fabry-Pérot*, juntamente com extensómetros eléctricos de resistência. Na Figura 2.17 é mostrada a localização destes equipamentos de medição numa secção do tabuleiro da ponte.

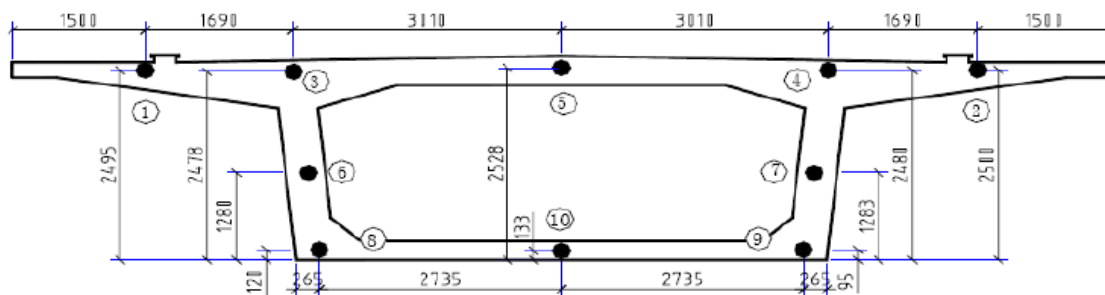


Figura 2.17 - Localização dos sensores numa secção do tabuleiro da ponte *Liaohé* [5]

Após a sua construção foi realizado um ensaio de carregamento cíclico, fazendo passar um comboio pelo tabuleiro da ponte. Na Figura 2.18 encontram-se as extensões causadas pela passagem da locomotiva na parte superior do tabuleiro. Pode-se evidenciar que as extensões obtidas pelos sensores de fibra óptica estão em concordância com as extensões obtidas pelos extensómetros.

Dos resultados obtidos para este teste, os autores concluíram que este tipo de sensor de fibra óptica possui um grande potencial para ser utilizado na monitorização de estruturas por apresentar um bom comportamento em serviço, aliado a um baixo custo [5].

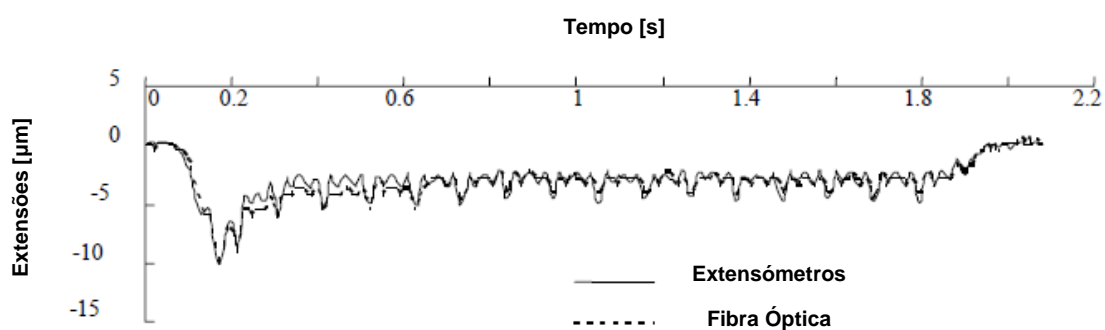


Figura 2.18 - Extensões obtidas pelos sensores de fibra óptica e pelos extensómetros devido à passagem do comboio [5]

### 2.4.2 Sensores de fibra óptica com redes de Bragg

No núcleo de um cabo de fibra óptica, através da projecção de radiação ultra-violeta, são gravadas faixas periódicas ao longo de vários milímetros, por alteração do índice de refração da

fibra. Tal é conseguido tirando partido da fotossensibilidade da sílica. Estas faixas são denominadas redes de *Bragg* e possuem, tipicamente, um espaçamento inferior a um micron [30], [6].

#### 2.4.2.1 Modo de funcionamento

Como foi dito anteriormente, a luz é composta por vários comprimentos de onda. Portanto, quando um feixe de luz, emitido a partir de uma fonte, é injectado na fibra óptica, o comprimento de onda que coincide com o afastamento da rede de *Bragg*, é reflectido e os restantes comprimentos de onda são transmitidos sem serem afectados pela rede (ver Figura 2.19) [30], [8].

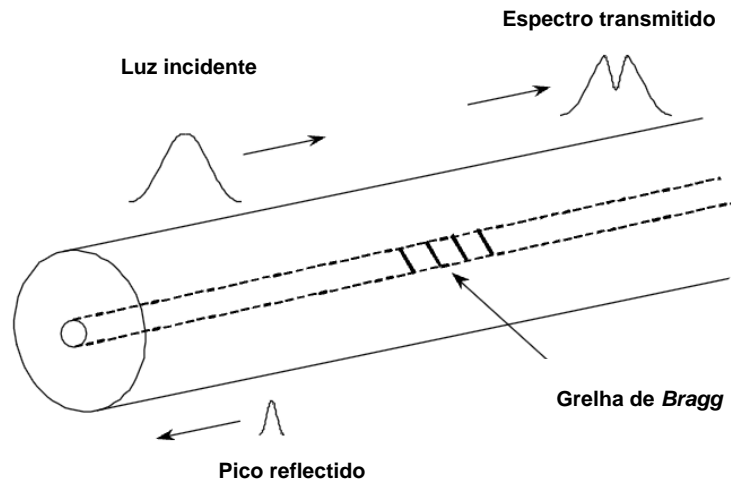


Figura 2.19 - Espectro de luz emitida, transmitida e reflectida

O comprimento de onda reflectido pela rede de *Bragg*, relaciona-se directamente com o espaçamento desta através da Equação (2.18)

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2.18)$$

onde  $\lambda_B$  é o comprimento de onda da luz reflectida pela rede de *Bragg*,  $n$  é o índice de refração e  $\Lambda$  é o espaçamento da rede de *Bragg* [6].

Deste modo, analisando o espectro de luz reflectida com recurso a um espectrómetro, conhece-se a variação do espaçamento da rede e, portanto, as extensões.

Como o espaçamento da rede é dependente da variação de temperatura e das deformações sofridas pela fibra óptica devido às acções mecânicas, torna-se, assim, possível quantificar estas duas grandezas [8].

#### 2.4.2.2 Multiplexagem

A vantagem destes extensómetros reside no seu potencial de multiplexagem, isto é, de se poder gravar várias redes de *Bragg* ao longo de um único cabo de fibra óptica. Cada rede possui um espaçamento específico de modo a reflectir comprimentos de onda diferentes, possibilitando a medição de extensões em vários pontos de uma estrutura [8].

#### 2.4.2.3 Aplicações em engenharia civil

Foram utilizados sensores de fibra óptica com redes de *Bragg*, por exemplo, na ponte suspensa de *Stork*, construída em 1996, em *Winterthur*, Suíça (ver Figura 2.20). A ponte possui

120 m de comprimento, passando por cima de 18 linhas férreas. O seu aspecto mais inovador reside no uso de dois cabos de *CFRP* no sistema de suspensão, sendo cada um deles composto por 241 fios de 5 mm de diâmetro. Este material foi escolhido por ter, em relação ao aço, uma boa resistência à corrosão e à fadiga e, ainda, por apresentar uma elevada tensão de rotura. De modo a avaliar o seu comportamento durante a fase de construção e de vida útil da estrutura, um fio de fibra óptica com 7 redes de Bragg foi enrolado à volta dos fios de *CFRP* de cada cabo, junto às cabeças de ancoragem. Na Figura 2.21 pode-se constatar que as redes de *Bragg* (*BG*) encontram-se aderentes tanto a fios de *CFRP* tensionados, como a fios de *CFRP* inactivos que actuam como compensadores das variações térmicas.

As extensões registadas por estes sensores de fibra óptica durante a fase de construção da ponte e durante um período de serviço superior a três anos possuem um desvio padrão de 2,5  $\mu\text{m}/\text{m}$  em relação às extensões registadas por extensómetros eléctricos de resistência que também foram previamente instalados [30].



Figura 2.20 - Ponte de *Stork* em *Winterthur*, Suíça

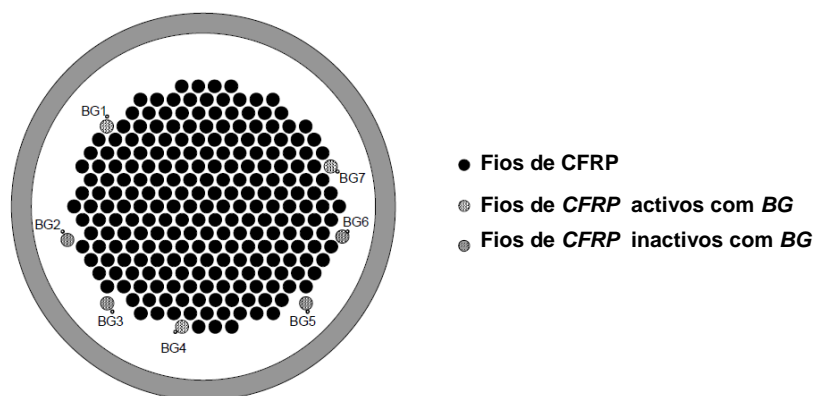


Figura 2.21 – Posição das redes de *Bragg* nos cabos de *CFRP* [30]



### 2.4.3 Sensores interferométricos SOFO

O sistema *SOFO* é composto por dois interferômetros de *Michelson* de baixa coerência montados em série.

O primeiro interferômetro consiste em duas fibras ópticas que possuem um espelho na sua extremidade. Uma dessas fibras (fibra de medição) é pré-tensionada e acoplada a uma dada estrutura, acompanhando as suas deformações mecânicas e térmicas. A outra fibra (fibra de referência), encontra-se solta dentro de um tubo, medindo, apenas, as extensões resultantes da variação de temperatura. Alternativamente, podem ser colocados vários pares de reflectores parciais ao longo das duas fibras ópticas, dando azo à multiplexagem.

O segundo interferômetro de *Michelson* (interferômetro de referência) encontra-se no interior de uma unidade de leitura portátil e consiste, também, em duas fibras ópticas. Uma destas fibras possui um espelho fixo na sua extremidade e a outra fibra é dotada de um espelho móvel capaz de introduzir uma distância conhecida entre espelhos [19], [18], [20].

Na Figura 2.22 encontra-se ilustrado o sistema *SOFO* que foi acima descrito.

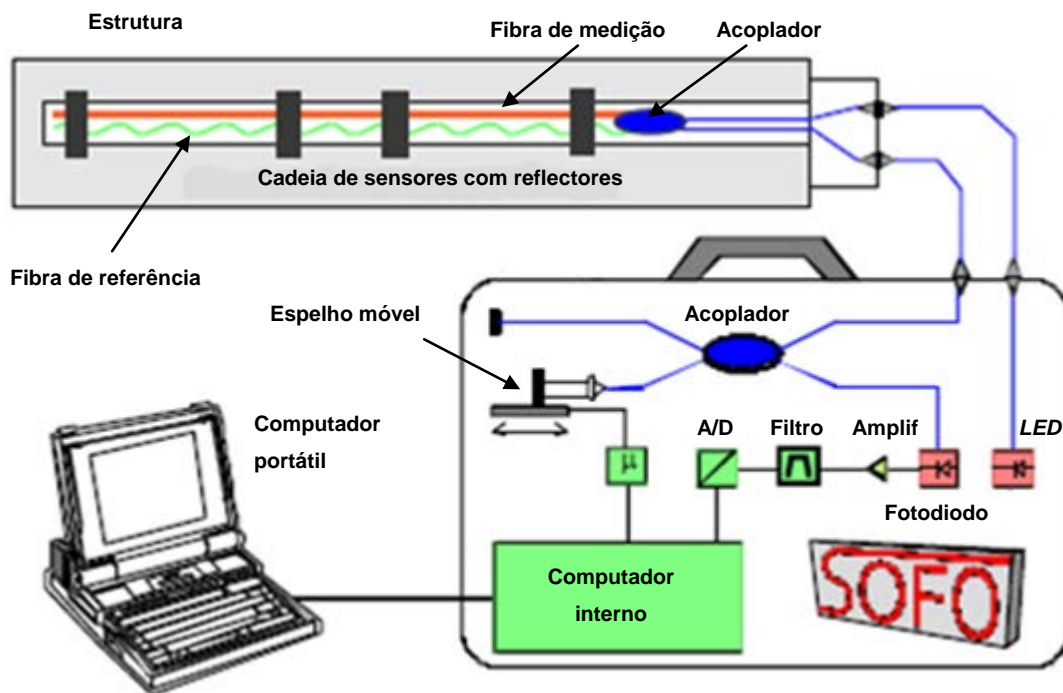


Figura 2.22 - Constituição do sistema *SOFO* [18]

#### 2.4.3.1 Modo de funcionamento

Um *LED*, contido na unidade de leitura, emite uma luz de baixa coerência que é separada, através de um acoplador direccional, em duas partes. Uma metade é direccionada para a fibra de medição e a outra para a fibra de referência. A luz é reflectida de volta para o acoplador pelos espelhos das duas fibras. Este acoplador, por sua vez, recombina os feixes de luz com ligeiro desfasamento, devido à diferença de comprimento entre as duas fibras ( $\Delta L_1$ ), e direcciona-os para o segundo interferômetro de *Michelson* contido na unidade de leitura.

Tal como foi referido acima, o segundo interferómetro de *Michelson* é composto por uma fibra óptica com um espelho fixo na sua extremidade, e uma outra fibra óptica que dispõe de um espelho móvel que permite introduzir uma distância conhecida entre espelhos ( $\Delta L_2$ ).

Dada a baixa coerência da luz emitida pelo *LED* (radiação de  $1,3 \mu\text{m}$  com comprimento de coerência<sup>2</sup>  $L_c = 30 \mu\text{m}$ ), apenas são visíveis picos de interferência quando  $\Delta L_1 \leq L_c$  ou  $\Delta L_2 \leq L_c$ . Portanto, quando a diferença do caminho óptico<sup>3</sup> entre os espelhos do interferómetro de referência é igual à diferença do caminho óptico entre os espelhos das duas fibras instaladas numa dada estrutura, ou seja, quando  $\Delta L_1 = \Delta L_2$  ou  $\Delta L_1 = -\Delta L_2$ , podem ser observados dois picos de interferência (picos laterais), desde que  $\Delta L_1$  e  $\Delta L_2$  sejam inferiores a  $L_c$ . Um terceiro pico é visível e usado como referência quando os braços do interferómetro de referência possuem o mesmo comprimento, isto é, quando  $\Delta L_2 = 0$  (pico central).

Os picos laterais ocupam uma posição simétrica em relação ao pico central e a distância que os separa deste último corresponde à diferença de comprimento entre a fibra de medição e a fibra de referência instaladas numa dada estrutura. Deste modo, as extensões sofridas por essa estrutura devido às acções mecânicas, podem ser quantificadas, medindo a distância que separa os picos laterais do pico central (ver Figura 2.23) [20].

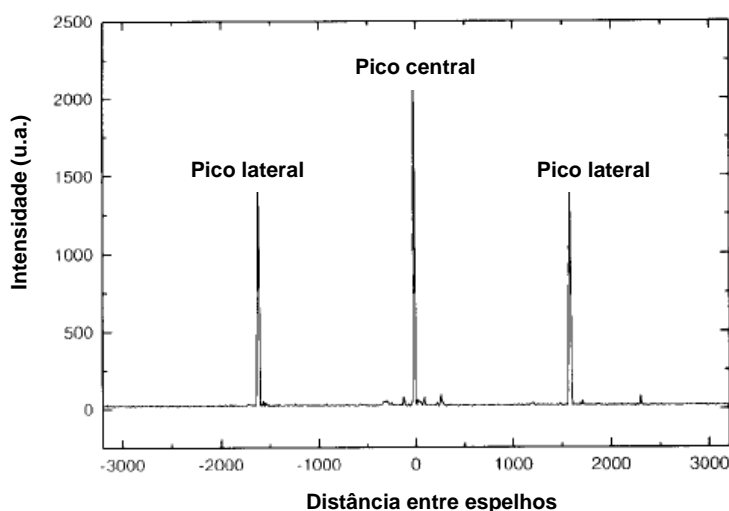


Figura 2.23 - Picos de interferência registados por um sensor *SOFO* [20]

#### 2.4.3.2 Aplicações em engenharia civil

As pontes Norte e Sul de *Versoix*, em Genebra, Suíça, são duas pontes paralelas em que cada uma delas era constituída, inicialmente, por um tabuleiro de betão com 30 cm de espessura apoiado sobre duas vigas de betão armado pré-esforçado e duas consolas (uma interna e outra externa). Cada uma destas pontes albergava duas vias de tráfego.

<sup>2</sup> Comprimento de coerência: Valor máximo resultante da diferença do caminho óptico entre duas ondas electromagnéticas, até ao qual são visíveis padrões de interferência [47]

<sup>3</sup> Caminho óptico: Distância percorrida pela luz, multiplicada pelo índice de refração do meio de propagação [47]

Quando se procedeu ao alargamento do tabuleiro das duas pontes, de modo a que cada uma delas pudesse acomodar uma terceira via de tráfego e uma via de emergência, foram instalados mais de 100 sensores *SOFO*. Os sensores foram implementados com o intuito de quantificar as diferenças de retracção entre o betão velho e o betão novo e, também, para avaliar o comportamento à flexão (vertical e horizontal) e à torção da estrutura causados pelo acréscimo do seu peso próprio e do pré-esforço aplicado durante as duas fases de construção. Na primeira fase de construção foram demolidas as consolas interiores e, depois, procedeu-se à reconstrução de consolas maiores. Na segunda fase de construção efectuou-se a demolição das consolas exteriores para permitir o alargamento da alma das vigas exteriores, seguindo-se a reconstrução de consolas maiores, suportadas, agora, por perfis metálicos. Ambas as fases foram executadas em troços de 14 m.

Na Figura 2.24 pode-se evidenciar a sobreposição da secção inicial com a secção final do tabuleiro de cada uma das duas pontes e a posição dos sensores *SOFO* instalados [19].

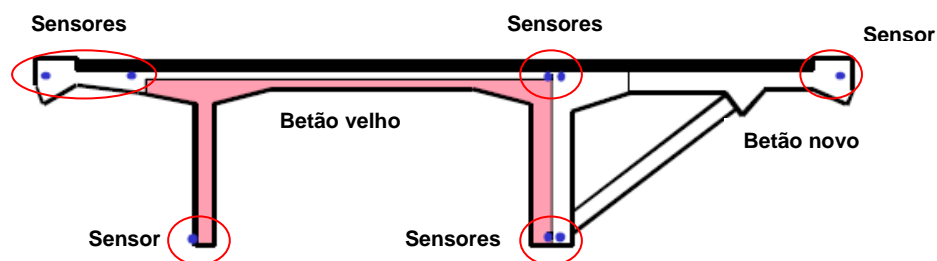


Figura 2.24 - Secção do tabuleiro da nova ponte de Versoix [19]

#### 2.4.4 Sensores distribuídos de dispersão de Brillouin e de dispersão de Raman

O princípio da dispersão de *Brillouin* e de *Raman* baseia-se na interacção não linear da luz com o núcleo de vidro da fibra óptica.

Quando uma luz intensa, com um comprimento de onda conhecido, é emitida no interior da fibra óptica, uma pequena fracção desta é dispersada ao longo da fibra. Esta luz dispersada divide-se numa componente - a componente de *Rayleigh* - que possui o seu comprimento de onda original,  $\lambda_0$ , e em duas componentes com comprimentos de ondas superiores e inferiores ao comprimento de onda emitido na fibra (componentes de *Brillouin* e de *Raman*). As componentes de *Brillouin* e de *Raman* retêm informação localizada acerca da temperatura e das extensões que se encontram instaladas na fibra óptica (ver Figura 2.25) [7].

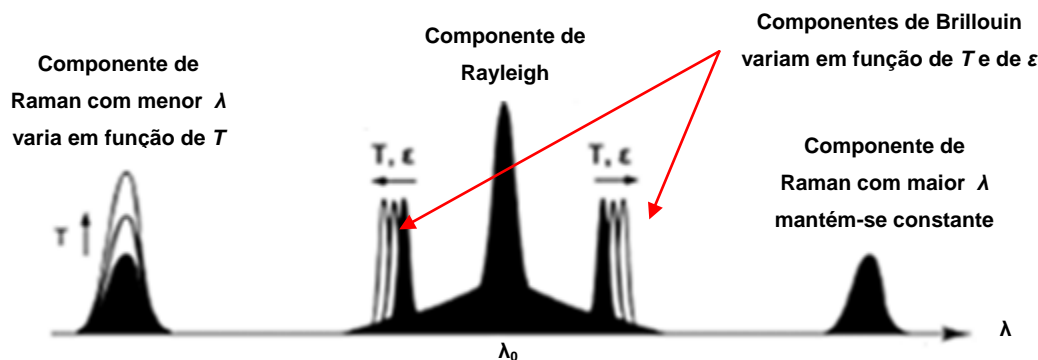


Figura 2.25 - Dispersão da luz emitida: componente de *Rayleigh*, *Brillouin* e *Raman* [7]

#### 2.4.4.1 Dispersão de Brillouin

Os dois picos das componentes de *Brillouin*, mostradas na Figura 2.25, são simétricos em relação à componente de *Rayleigh*. No entanto, a sua posição varia em função da temperatura e das extensões instaladas na secção de fibra considerada.

Sabe-se que a dispersão de *Brillouin* resulta da variação de densidade da fibra óptica devido a forças electromagnéticas que são geradas pela interacção da luz emitida com a própria fibra. Estas variações de densidade geram ondas acústicas que se propagam no interior da fibra óptica. A variação do comprimento de onda das componentes de *Brillouin* é proporcional à velocidade acústica na fibra que, por sua vez, está relacionada com a sua densidade. Sendo a densidade dependente da temperatura e das extensões, a partir da sua variação, é possível quantificar estas duas grandezas numa dada secção de fibra óptica [7], [39].

#### 2.4.4.2 Dispersão de Raman

Os dois picos das componentes de *Raman* também são simétricos em relação à componente de *Rayleigh*, como se pode constatar na Figura 2.25. Ao contrário das componentes de *Brillouin*, as componentes de *Raman* encontram-se numa posição fixa. Estas componentes resultam da reemissão de luz adsorvida pela fibra óptica a comprimentos de onda inferiores e superiores ao comprimento de onda da luz emitida.

A amplitude da componente de *Raman* com menor comprimento de onda depende da temperatura, ao passo que a componente com maior comprimento de onda não depende.

Analisando o rácio de intensidade entre os dois picos, obtém-se, então, a variação de temperatura a que uma dada secção da fibra óptica se encontra sujeita [7], [39].

#### 2.4.4.3 Aplicações em engenharia civil

A barragem de *Plavinu*, situada na Letónia, possui uma galeria de inspecção coincidente com um sistema de três juntas de betonagem que ligam dois blocos de betão da estrutura (ver Figura 2.26). Tendo em conta que a mesma foi construída há 40 anos e o desgaste que as juntas de betonagem vêm sofrendo por estarem expostas ao efeito abrasivo da água, existe o risco de o betão fendilhar devido a uma redistribuição de esforços, levando, conseqüentemente, à inundação da galeria. Para combater esta ameaça, foram instalados sensores distribuídos de dispersão de *Brillouin*

para monitorizar as deformações do betão nas imediações das juntas (ver Figura 2.27). Estes sensores encontram-se solidarizados ao betão através de chapas metálicas aparafusadas de dois em dois metros, e são capazes de medir deformações mecânicas bem como deformações térmicas, em intervalos de 15 min [7].



Figura 2.26 - Barragem de *Plavínu*, Letónia [7]



Figura 2.27 - Instalação dos sensores de difusão de *Brillouin* na galeria de inspecção [7]

## 2.5 Ultra-sons

Nos trabalhos de *Chaki e Bourse* [3] e de *Washer, Green e Pond Jr.* [46], foram utilizados transdutores piezoelétricos e transdutores acústicos electromagnéticos (*EMAT*), respectivamente, para determinar o pré-esforço instalado em cordões de pré-esforço.

Neste capítulo será feita uma breve referência a estes equipamentos e aos trabalhos dos referidos autores.

### 2.5.1 Transdutores piezoelétricos

Os transdutores piezoelétricos são dotados de um elemento activo que é responsável pela conversão de um sinal eléctrico numa onda sonora e vice-versa. Este elemento é, essencialmente, constituído por um piezoelétrico polarizado com dois eléctrodos ligados em faces opostas, de modo

a permitir a passagem de corrente eléctrica. Quando lhe é induzida uma corrente alterna, o elemento activo é traccionado e comprimido por efeito de electrostricção, gerando ondas mecânicas (som) com uma frequência igual à corrente eléctrica. O efeito inverso ao da electrostricção é conhecido como efeito piezoeléctrico, ou seja, quando o elemento activo é deformado por uma força mecânica (e.g. onda de som), este elemento origina uma corrente eléctrica [25], [38].

#### 2.5.1.1 Frequência de ressonância

A excitação do piezoeléctrico com uma corrente eléctrica sinusoidal, leva a que as suas partículas oscilem segundo curvas sinusoidais que, por sua vez, dão origem à propagação de uma onda de som no seu interior. Uma parte do som gerado é reflectido internamente no piezoeléctrico, enquanto a outra parte é transmitida.

Quando a frequência da corrente de excitação iguala a frequência natural de vibração do piezoeléctrico, este entra em ressonância.

Existem várias frequências de ressonância, cada uma associada a um modo de vibração que depende da forma do piezoeléctrico. Nos transdutores piezoeléctricos, o elemento activo possui a forma de uma placa de modo a que vibre em ressonância na direcção da sua espessura. Tal é verificado quando a espessura do piezoeléctrico é igual a metade do comprimento de onda da frequência de ressonância.

Note-se que o piezoeléctrico não é sensível apenas a uma única frequência de ressonância, mas, sim, a uma gama de frequências centradas na frequência de ressonância. Este intervalo de frequências de excitação é designado por largura de banda [38].

#### 2.5.1.2 Transdutores de contacto

Os transdutores de contacto emitem ondas acústicas perpendiculares à superfície do material de teste. Os três elementos principais que constituem estes transdutores são o piezoeléctrico, a camada de amortecimento e o calço (ver Figura 2.28) [38].

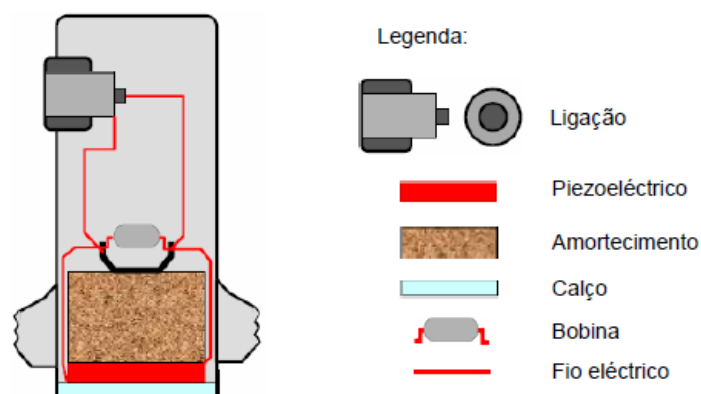


Figura 2.28 - Exemplo de um transdutor de contacto [38]

### 2.5.1.3 Acoplante

Os transdutores piezoelétricos de contacto necessitam de um acoplante para minimizar as perdas de energia acústica transmitida ao material de teste, devido à elevada diferença de impedância acústica entre o ar e materiais sólidos.

Existem diversos tipos de acoplantes, tais como a glicerina, a água e óleos, que são aplicados entre a face do transdutor e o elemento de ensaio.

## 2.5.2 Transdutores acústicos electromagnéticos (EMAT)

Ao contrário dos transdutores piezoelétricos, os transdutores acústicos electromagnéticos funcionam apenas em materiais condutores (e.g. aço), sendo o próprio material responsável pela geração de ondas de som. Estes transdutores operam sem ter de entrar em contacto com o espécime, eliminando a necessidade de um acoplante. São constituídos, essencialmente, por dois componentes principais: uma bobine e um íman permanente ou electromagnético.

Existem dois tipos de transdutores acústicos electromagnéticos, nomeadamente, os que se baseiam no mecanismo das forças de *Lorentz* e aqueles que funcionam segundo o princípio da magnetostricção [33].

### 2.5.2.1 EMAT baseado no mecanismo das forças de Lorentz

Estes transdutores são constituídos por uma bobine colocada por baixo de um íman permanente que exerce sobre esta um campo magnético estático perpendicular. Quando a bobine é sujeita a uma corrente alterna com a frequência ultra-sonora desejada, gera-se um campo magnético variável no tempo que, por sua vez, induz correntes de *Eddy* no material de teste. A interacção das correntes de *Eddy* com o campo magnético estático do íman origina forças magnéticas periódicas designadas por forças de *Lorentz*. Estas forças, dadas pela Equação (2.19), vão gerar ondas ultra-sonoras que se propagam no interior do material de ensaio.

$$F = J \times B \quad (2.19)$$

$F$  representa as forças de *Lorentz*,  $J$  representa as correntes de *Eddy* induzidas e  $B$  é o campo magnético estático.

Verifica-se o efeito contrário, quando uma onda ultra-sonora passa pela bobine deste tipo de EMAT, na presença de um campo magnético estático [38], [33], [24].

Na Figura 2.29, estão ilustrados dois EMAT's que funcionam com base neste mecanismo.

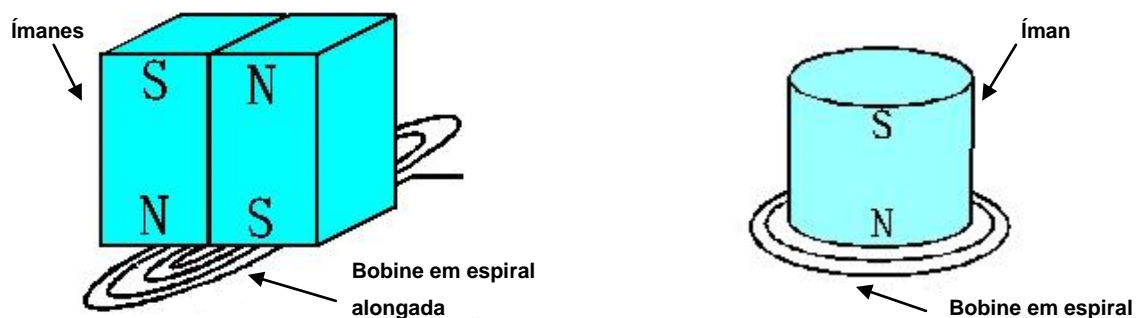


Figura 2.29 - EMAT's baseados no mecanismo das forças de *Lorentz* [17]

### 2.5.2.2 EMAT baseado no princípio da magnetostricção

A magnetostricção é um fenómeno que se manifesta como a variação das dimensões de um material condutor quando este é sujeito a um campo magnético. A deformação do material deve-se à reorientação dos seus domínios magnéticos, na medida em que os domínios orientados de forma mais favorável, segundo o campo magnético induzido, aumentam em detrimento daqueles que se encontram alinhados de uma forma menos favorável.

Para se tirar partido do efeito da magnetostricção, é necessário posicionar uma bobine entre dois ímanes permanentes, de modo a se criar um campo magnético estático paralelo ao elemento de ensaio (e.g. fio de pré-esforço). Este campo magnético pré-orienta os domínios magnéticos do material condutor segundo o seu eixo longitudinal.

Quando a bobine é sujeita a uma corrente alterna, é induzido no material condutor um campo magnético variável no tempo que deforma, ainda mais, os domínios magnéticos pré-orientados pelos ímanes. Desta forma, maximiza-se o efeito da magnetostricção.

Admitindo que a frequência da corrente alterna se situa no domínio ultra-sonoro, as deformações resultantes deste fenómeno são, apenas, localizadas nas imediações da bobine, devido à inércia do material condutor. Estas deformações geradas propagam-se, então, sob a forma de ondas ultra-sonoras pelo espécime de teste.

Verifica-se o efeito inverso da magnetostricção quando uma onda ultra-sonora intercepta a bobine deste EMAT, na presença do campo magnético estático [33].

Na Figura 2.30 estão ilustrados dois EMAT's magnetostrictivos.

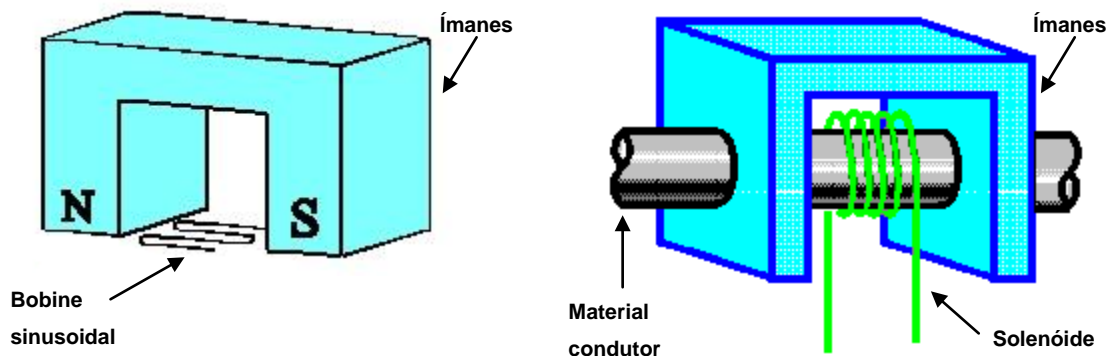


Figura 2.30 - EMAT's magnetostrictivos [17]

### 2.5.3 Trabalho de Chaki e Bourse

Chaki e Bourse [3] propuseram validar um método que permite determinar a tensão instalada em cordões de pré-esforço, tirando partido do efeito acustoelástico das ondas ultra-sonoras.

O efeito acustoelástico caracteriza-se pela variação da velocidade de propagação de ondas ultra-sonoras num dado material, em função da tensão que lhe é aplicada ou de tensões residuais. De acordo com a Equação (2.20), a velocidade de propagação de uma onda ultra-sonora para um determinado estado de tensão não nula é dada por



$$V_{\sigma} = V_0(1 + K\sigma) \quad (2.20)$$

em que,  $V_{\sigma}$  é a velocidade para um estado de tensão diferente de zero,  $V_0$  é a velocidade inicial para um estado de tensão nula,  $K$  é a constante acustoelástica e  $\sigma$  a tensão instalada no material de teste.

Foram realizados dois ensaios para obter a curva de calibração que relaciona a variação unitária da velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras com a tensão instalada num cordão de pré-esforço de 15,7 mm de diâmetro. Através desta curva, extraiu-se o valor da constante  $K$ .

### 2.5.3.1 Equipamentos utilizados nos ensaios

O cordão de pré-esforço foi tensionado por uma prensa hidráulica e foram utilizados os equipamentos para o sistema de geração e captação de ondas ultra-sonoras, esquematizados na Figura 2.31.

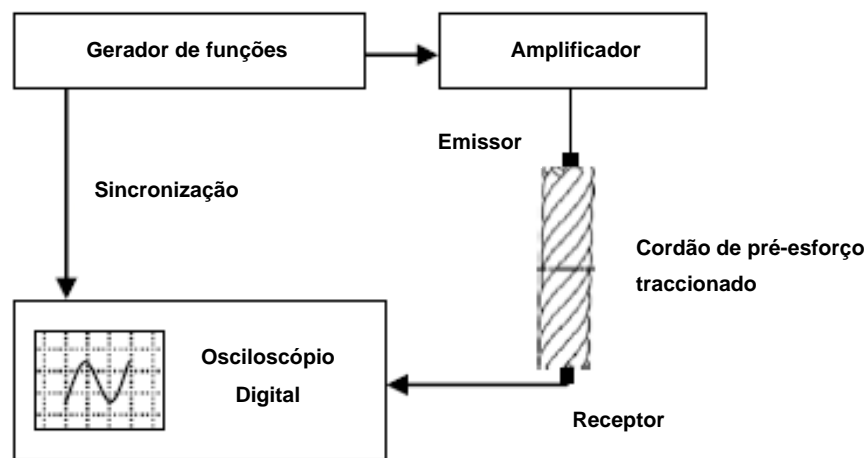


Figura 2.31 – Montagem dos equipamentos utilizados nos ensaios de *Chaki e Bourse* [3]

O gerador de funções emite um sinal de excitação que é amplificado e depois injectado no transdutor piezoeléctrico emissor. Este, por sua vez, emite uma onda ultra-sonora que é captada por um transdutor piezoeléctrico receptor com características idênticas ao do emissor. Um osciloscópio digital é usado para visualizar o desfaseamento ( $\Delta t$ ), no domínio do tempo, entre a onda de som recebida para um estado de tensão não nula e a onda de som recebida para um estado de tensão nula (ver Figura 2.32).

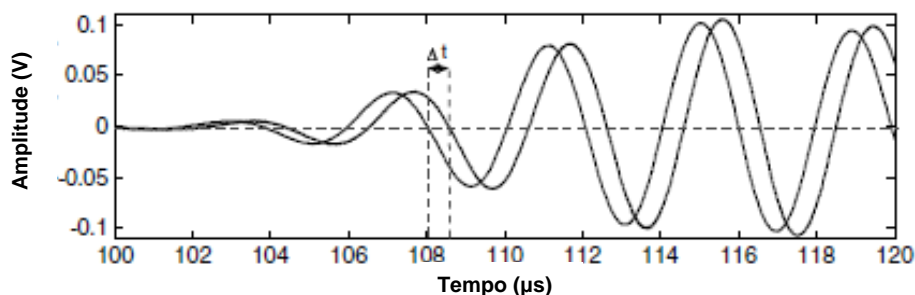


Figura 2.32 – Medição do desfaseamento entre ondas ultra-sonoras captadas [3]

### 2.5.3.2 Considerações preliminares

Os autores analisaram, previamente, a distribuição de forças ao longo dos sete fios que compõem o cordão de pré-esforço e concluíram que a força instalada no fio central é apenas 1,09 vezes superior à força instalada nos fios helicoidais. Nesse sentido, admitiu-se uma distribuição uniforme do pré-esforço aplicado ao cordão pelos sete fios que o compõem. Este facto permitiu efectuar medições da velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras apenas no fio central, uma vez que o seu comportamento é conhecido para esta situação.

A frequência de excitação dos transdutores e o modo de propagação das ondas ultra-sonoras emitidas, foram escolhidos de forma a maximizar o efeito acustoelástico. Foi verificado que a atenuação é mínima para uma frequência de 230 kHz, e para o primeiro modo de vibração longitudinal.

### 2.5.3.3 Determinação da curva de calibração

Realizaram-se dois ensaios de calibração num cordão de pré-esforço com 492 mm de comprimento e 15,7 mm de diâmetro.

Foram instalados, previamente, seis extensómetros eléctricos de resistência em um quarto de ponte, para quantificar as extensões sofridas pelo cordão, de modo a ter em conta o seu alongamento no efeito acustoelástico.

Antes de se iniciarem os ensaios, o cordão de pré-esforço foi traccionado até 1400 MPa e depois descarregado, para reduzir o efeito de eventuais tensões residuais instaladas que pudessem comprometer os resultados das medições a serem realizadas.

Durante a fase de execução destes ensaios, o mesmo cordão de pré-esforço foi tensionado com incrementos de carga de 20 kN (132 MPa) até 70 % da tensão de rotura (1300 MPa), seguindo-se o seu descarregamento em passos de 20 kN.

Por fim, obtiveram-se as seguintes curvas de calibração mostradas na Figura 2.33.

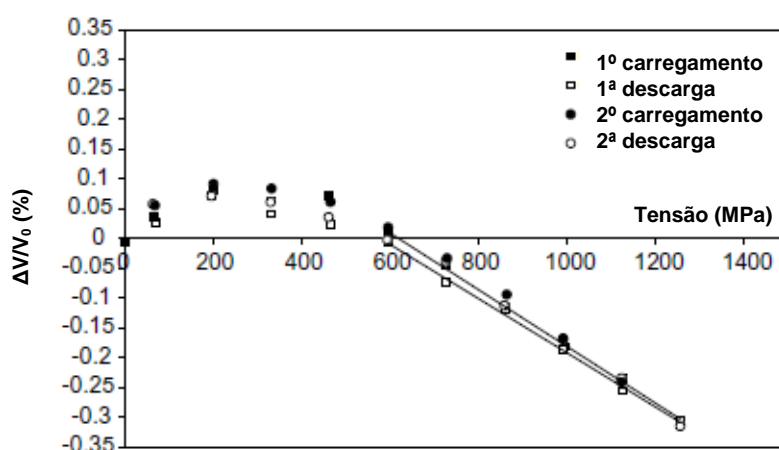


Figura 2.33 - Curvas de calibração acustoelásticas obtidas por Chaki e Bourse [3]

Pode-se constatar que, até 32 % da tensão de rotura (600 MPa), a curva de calibração apresenta um comportamento não linear positivo que contradiz a teoria da acustoelasticidade. Esta teoria estipula que a constante  $K$  (declive) deve ser negativa, ou seja, que a velocidade de propagação de uma onda ultra-sonora diminui com o aumento de tensão aplicada. As discrepâncias registadas devem-se, na opinião dos autores, a tensões residuais pré-existentes no cordão e/ou a uma curvatura inicial do mesmo. No entanto, a partir de 600 MPa, a curva de calibração apresenta um troço linear negativo, entrando em concordância com a teoria da acustoelasticidade. Fizeram-se duas regressões lineares no troço recto do gráfico, tendo sido obtido um coeficiente acustoelástico médio de  $K = -4,78 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$  com um desvio padrão de  $0,13 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ .

Visto que a tensão de serviço instalada nos cordões de pré-esforço se situa entre 45 – 75 % da tensão de rotura, o coeficiente acustoelástico obtido dos ensaios de calibração pode ser utilizado *in situ* para avaliar o pré-esforço em cordões do mesmo tipo.

## 2.5.4 Trabalho de *Wahser, Green e Pond Jr.*

À semelhança do trabalho realizado por *Chaki e Bourse* [3], os autores *Wahser, Green e Pond Jr.* [46] propuseram determinar as curvas de calibração de fios e de cordões de pré-esforço com recurso a *EMAT's* magnetostrictivos, em vez de transdutores piezoelétricos.

### 2.5.4.1 Equipamentos de medição utilizados

Na Figura 2.34 é mostrado o esquema de montagem adoptado pelos autores para a realização dos ensaios experimentais propostos.

Os fios e cordões testados foram fixados e tensionados numa prensa hidráulica. Monitorizou-se a carga aplicada a estes espécimes com recurso a uma célula de carga.

Foram usados três *EMAT's* magnetostrictivos em que um deles funcionava como emissor e os outros dois como receptores. Os aparelhos receptores foram posicionados a uma distância fixa de 500 mm, através de um tubo.

Por fim, escolheu-se uma frequência de excitação de 320 kHz, dando origem a ondas ultra-sonoras longitudinais que se propagavam pelos espécimes testados. A velocidade de propagação destas ondas foi calculada, medindo-se a diferença do tempo de percurso ( $\Delta t$ ) entre as ondas detectadas pelo *EMAT* receptor 1 e pelo *EMAT* receptor 2.

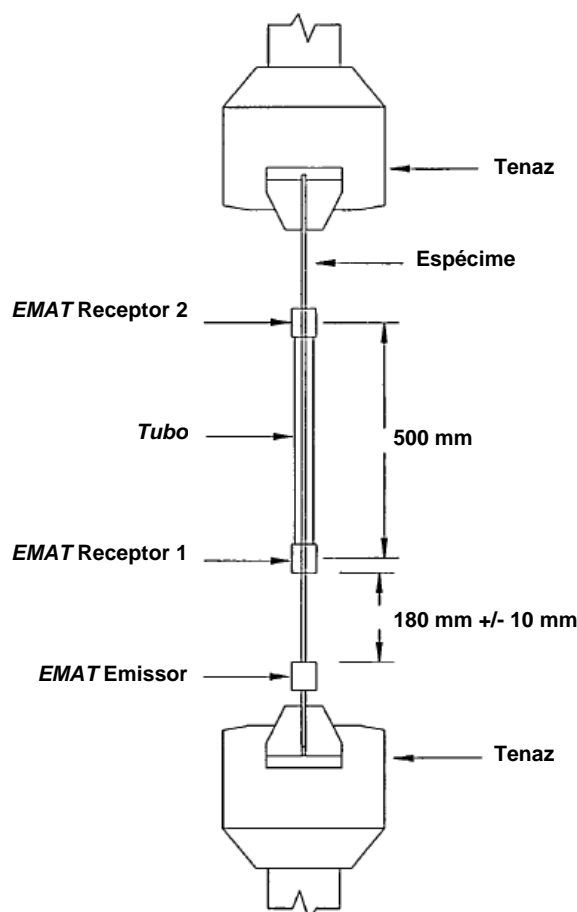


Figura 2.34 - Sistema de ensaio adoptado por *Washer, Green e Pond Jr.* [46]

#### 2.5.4.2 Espécimes de teste

Os autores efectuaram medições em dois cordões de pré-esforço com 12,7 mm de diâmetro e em um cordão com 9,53 mm de diâmetro. Estes cordões pertenciam ao mesmo fornecedor, mas foram fabricados em anos distintos. Um dos cordões de 12,7 mm foi fabricado no ano de 1990 (Cordão 1) e o outro cordão, com o mesmo diâmetro, foi fabricado no ano de 2000 (Cordão 2). O cordão com 9,53 mm de diâmetro também foi fabricado no ano de 1990 (Cordão 3).

Foram feitas, também, medições no fio central do Cordão 1 e do Cordão 2, depois de terem sido removidos os respectivos fios helicoidais. O fio central do Cordão 1 possui um diâmetro de 4,34 mm (Fio 1) e o fio central do Cordão 2 possui um diâmetro de 4,24 mm (Fio 2).

Por fim, foram testados, ainda, dois fios de pré-esforço com 5,18 mm de diâmetro, provenientes de fornecedores diferentes, tendo sido um destes fios fabricado no ano de 1990 (Fio 3) e o outro no ano de 2000 (Fio 4).

Os cordões e os fios de pré-esforço utilizados possuem uma tensão de rotura de 1860 MPa.

### 2.5.4.3 Determinação das curvas de calibração

Todos os espécimes testados foram, previamente, traccionados até 90 % da tensão de rotura e depois descarregados, para minimizar os efeitos das tensões residuais nas medições a serem feitas.

Na Figura 2.35 encontra-se a curva de calibração que foi obtida para o Cordão 3. Constata-se que esta curva apresenta um comportamento não linear, registando-se um aumento da velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras até uma tensão aplicada de 930 MPa (equivalente a 50 % da tensão de rotura). A partir desse valor de tensão, verifica-se que a velocidade de propagação das ondas diminui até um valor máximo de tensão aplicada de 1570 MPa. A curva de calibração sob análise, apresenta um comportamento semelhante à curva de calibração que foi obtida por *Chaki e Bourse* [3], para um cordão de pré-esforço com 15,7 mm de diâmetro.

As constantes acustoelásticas, obtidas para os cordões anteriormente referidos, encontram-se na Tabela 2.1. Estas constantes correspondem ao declive da recta ajustada ao troço descendente das curvas de calibração de cada um dos três cordões, nomeadamente, para valores de tensão situados entre 1030 e 1570 GPa.

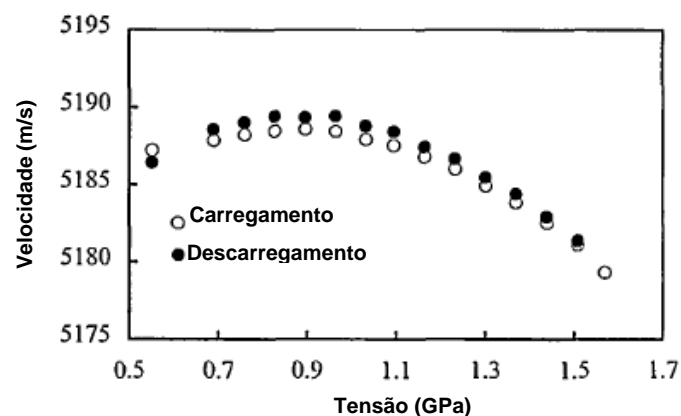


Figura 2.35 - Curva de calibração obtida para o Cordão 3 [46]

Tabela 2.1 - Constantes acustoelásticas calculadas para os três cordões utilizados [46]

Material	$\phi$ [mm]	Ano de fabrico	K [ $\times 10^{-6}$ MPa $^{-1}$ ]
Cordão 1	12,7	1990	-5,5
Cordão 2	12,7	2000	-3,4
Cordão 3	9,53	1990	-3,2

Na Figura 2.36 é mostrada a curva de calibração que foi obtida para o Fio 1. Constata-se que esta curva possui um comportamento não linear decrescente para qualquer valor de tensão aplicada.

As constantes acustoelásticas, obtidas para os fios acima mencionados, encontram-se na Tabela 2.2. Estas constantes correspondem ao declive da recta ajustada às curvas de calibração de cada um dos quatro fios, nomeadamente para valores de tensão situados entre 40-75 % da tensão de rotura.

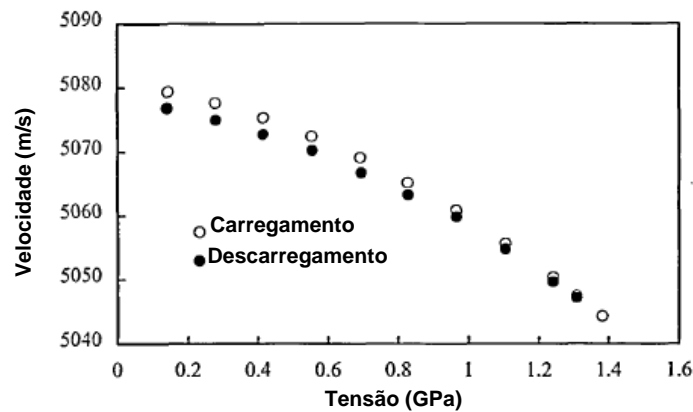


Figura 2.36 - Curva de calibração obtida para o Fio 1 [46]

Tabela 2.2 - Constantes acustoelásticas calculadas para os quatro fios utilizados [46]

Material	$\phi$ [mm]	Ano de fabrico	$K$ [ $\times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ ]
Fio 1	4,34	1990	-6,8
Fio 2	4,24	2000	-5,0
Fio 3	5,18	1990	-5,9
Fio 4	5,18	2000	-6,2

Os autores concluíram, com base nos resultados obtidos, que as constantes acustoelásticas variavam significativamente para materiais idênticos que cumpriam as mesmas especificações, mas que foram fabricados em anos diferentes. Este facto terá um impacto significativo na aplicação prática deste método proposto, uma vez que será necessária uma amostra do material sob análise para ser poder calcular a sua curva de calibração.

## 2.6 Sensores elastomagnéticos

Os sensores elastomagnéticos são utilizados para medir a tensão instalada em materiais ferromagnéticos, tais como barras, fios, cordões e cabos de pré-esforço, através da alteração das suas propriedades magnéticas que dependem do estado de tensão e da temperatura. Desta forma, calculando a variação da permeabilidade magnética relativa, é possível quantificar as tensões instaladas num dado elemento ferromagnético. A permeabilidade magnética relativa,  $\mu_r$ , define-se como sendo a razão entre a permeabilidade desse elemento,  $\mu_m$ , e a permeabilidade do vácuo,  $\mu_0$ .

Estes sensores são constituídos por um cilindro oco de plástico que comporta uma bobine principal e uma bobine secundária. O material ferromagnético é inserido no cilindro de forma a ficar envolvido pelas duas bobines (ver Figura 2.37). Estes sensores vêm equipados, ainda, com um termopar para medir as variações de temperatura [11], [41], [45].

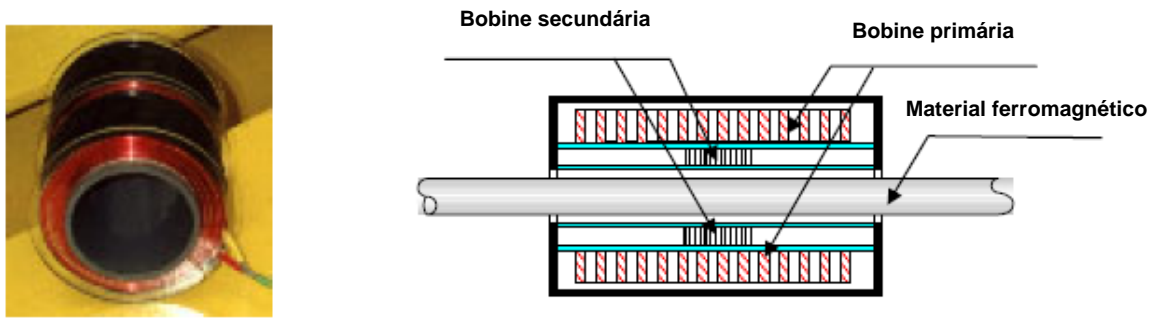


Figura 2.37 – Corte longitudinal de um sensor elastomagnético [41]

### 2.6.1 Modo de funcionamento

O valor da permeabilidade magnética relativa,  $\mu_r$ , dado pela Equação (2.21), é medido aplicando-se uma corrente contínua na bobine principal que magnetiza o material ferromagnético, causando uma variação da densidade de fluxo magnético que, por sua vez, induz uma tensão eléctrica na bobine secundária.

$$\mu_r = 1 + \frac{A_t}{A_s} \left( \frac{U_{out}}{U_0} - 1 \right) \quad (2.21)$$

$\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa,  $A_s$  é a área transversal do material ferromagnético,  $A_t$  é a área transversal da bobine secundária,  $U_{out}$  é a tensão eléctrica medida com o material ferromagnético e  $U_0$  é a tensão eléctrica medida sem o material ferromagnético.

Antes de serem instalados, os sensores elastomagnéticos são calibrados em laboratório ou *in situ*, com uma amostra do aço a ser utilizado em obra. Nos testes de calibração é determinada a relação entre a permeabilidade magnética relativa do aço e a tensão que lhe é aplicada, assim como a variação da permeabilidade magnética relativa com a temperatura para um estado de tensão nula. Na Figura 2.38 são mostradas duas curvas de calibração obtidas para um cordão de pré-esforço com 15,5 mm de diâmetro. A curva à esquerda foi obtida para uma temperatura de 72 °C e a curva à direita foi obtida para uma temperatura de 22 °C. Pode-se constatar que a relação entre a permeabilidade magnética relativa e a tensão aplicada se mantém constante, independentemente do valor da temperatura. Conclui-se, ainda, que a permeabilidade magnética relativa decresce com o aumento da temperatura [11], [41], [45].

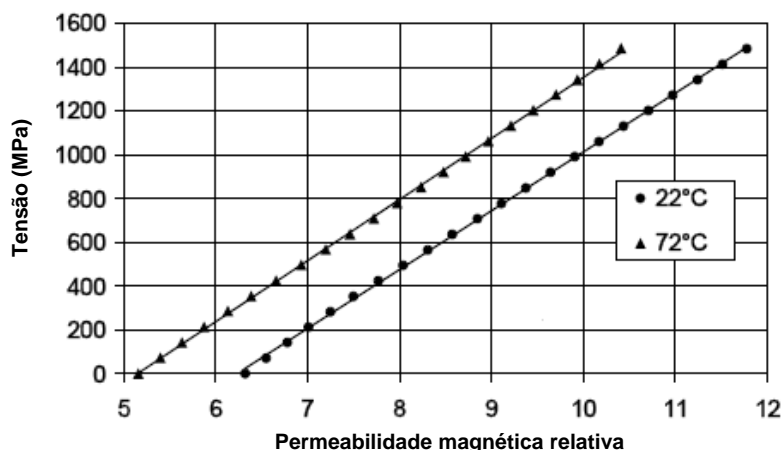


Figura 2.38 - Curvas de calibração obtidas para um cordão com 15,5 mm de diâmetro a temperaturas de 22 °C e 72 °C [11]

## 2.6.2 Aplicações em Engenharia Civil

A ponte *Jiangyin*, que atravessa o rio *Yangtze*, localizada na China, possui um sistema de monitorização composto por sensores elastomagnéticos. Foram instalados sensores activos nos cabos da ponte e sensores de referência para medir a temperatura numa amostra não tensionada do mesmo cabo.

Ao fim de mais de 4600 leituras efectuadas por estes sensores, durante os primeiros 30 dias da sua instalação, registou-se uma força média de 1250 kN com um desvio padrão de 1,73 kN, o que corresponde a um erro de 0,14 % [11].

## 2.7 Difracção de Raios-X e Método do Furo Cego

A técnica de difracção de raios-X e o método do furo cego são utilizados para medir tensões residuais resultantes de, por exemplo, processos de soldadura.

De seguida será feita uma breve introdução a cada um destes métodos.

### 2.7.1 Difracção de raios-X

Na técnica de difracção de raios-X, as tensões residuais são calculadas a partir das extensões sofridas pelos planos cristalinos do material sob análise, admitindo-se uma distorção elástica linear desses mesmos planos.

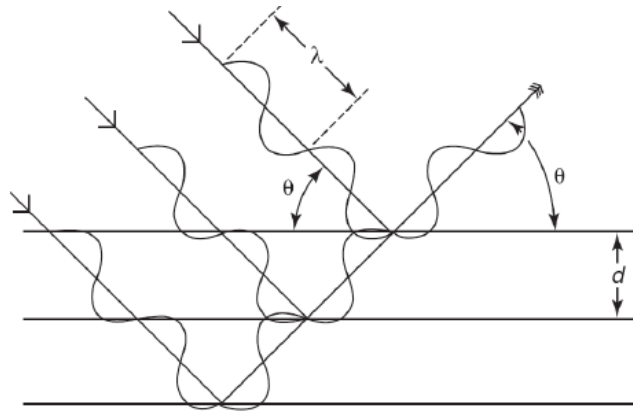
Essencialmente, esta técnica consiste em irradiar raios-X monocromáticos com um ângulo de incidência,  $\theta$ , sobre a superfície do espécime de teste de modo a que estes difracsem com um ângulo igual a  $2\theta$ .

De acordo com a lei de *Bragg*, a difracção ocorre quando é verificada a Equação (2.22)

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.22)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do raio-X,  $d$  é o espaçamento médio entre planos cristalinos e  $\theta$  é metade do ângulo de difracção (ver Figura 2.39).





**Figura 2.39 - Difracção de raios-X em planos cristalinos [37]**

Uma das técnicas empregues para determinar os espaçamentos interplanares, é a técnica de  $\sin^2\psi$  que consiste em inclinar, primeiramente, o material de teste em vários ângulos de valor  $\psi$ . Depois, para cada ângulo  $\psi$ , é extraído o valor do ângulo de difracção  $2\theta$  correspondente, de modo a se poder calcular o respectivo valor de  $d$  através da Equação (2.22). Sendo  $d$  linearmente dependente de  $\sin^2\psi$ , efectuando uma regressão linear ao conjunto de espaçamentos interplanares obtidos para os vários ângulos  $\psi$ , consegue-se determinar o declive da recta ajustada que corresponde ao termo  $\partial d / \partial \sin^2\psi$  da Equação (2.23). Esta última equação é utilizada para calcular as tensões residuais no material de teste.

$$\sigma = \left( \frac{1 + \nu}{E} \right) \frac{1}{d_0} \left( \frac{\partial d}{\partial \sin^2\psi} \right) \quad (2.23)$$

$E$  e  $\nu$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson,  $d_0$  é o espaçamento entre planos cristalinos para um estado de tensão nula e  $\sigma$  é a tensão residual instalada no material de teste [36], [37].

### 2.7.2 Método do furo cego

As tensões residuais são medidas efectuando-se um furo no centro de uma roseta posicionada sobre a superfície do material sob análise. A remoção da camada superficial do espécime, conduz a uma relaxação de tensões nas imediações do furo que são medidas pela roseta. Deste modo, é possível determinar a direcção e a magnitude das tensões principais. O furo efectuado no material de teste não deve introduzir novas tensões no mesmo, sendo, para esse efeito, utilizada uma broca de alta rotação. Assim, reduz-se a abrasão entre a superfície da broca e as paredes do furo.

O método do furo cego é usado, apenas, quando se verifica a uniformidade de tensões residuais ao longo da profundidade do furo efectuado. Este método não se aplica quando a uniformidade das tensões residuais se verifica, somente, na camada superficial do material. Porém, a sua aplicação está restrita a casos em que as tensões residuais não ultrapassem 30% da tensão de cedência do material. Caso um furo seja efectuado num material sujeito a tensões superiores ao limite estabelecido, poderá ocorrer a plastificação desse material no bordo do furo devido à redistribuição de tensões. Neste contexto, as medições realizadas com recurso à referida técnica tornam-se inviáveis visto que o cálculo das tensões residuais é feito em regime elástico [37], [16].



### 3 ENSAIO POR MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉCTRICA

#### 3.1 Objectivo

O presente ensaio foi concebido a partir do princípio de funcionamento dos extensómetros eléctricos cuja resistência eléctrica varia em função das deformações a que são sujeitos.

Utilizou-se, para o efeito, um fio de pré-esforço com 5 mm de diâmetro e 1,2 m de comprimento como espécime de teste.

Este ensaio experimental consiste em pré-esforçar o fio de aço para diferentes valores de carga, ao mesmo tempo que lhe é injectada uma corrente contínua de intensidade conhecida. Pretende-se, com isto, averiguar se ocorre uma variação linear da resistência eléctrica em função do pré-esforço aplicado.

Todos os trabalhos preparativos e de execução foram realizados no Laboratório de Investigação e Desenvolvimento do Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

#### 3.2 Trabalhos preparatórios

##### 3.2.1 Isolamento eléctrico do fio de pré-esforço

Em primeiro lugar, começou-se por enrolar dois fios condutores de cobre, espaçados de 700 mm, ao fio de pré-esforço. Seguidamente, este foi envolto em fita isoladora. A razão para o uso da fita isoladora prendeu-se com o facto de se querer garantir que o fluxo de corrente ocorria apenas entre os dois fios condutores. Porém, não se isolou o fio de pré-esforço até uma distância de 50 mm das suas extremidades, para evitar o escorregamento das cunhas cónicas que o prendiam quando fosse aplicado o pré-esforço (ver Figura 3.1).

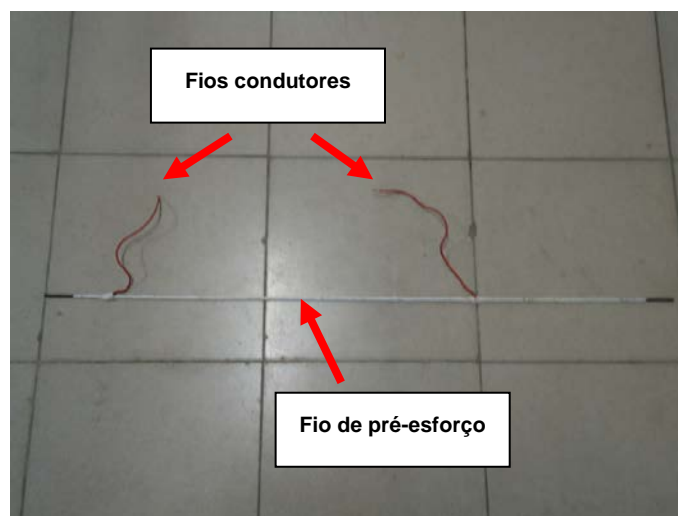


Figura 3.1 - Isolamento eléctrico do fio de pré-esforço com 1,2 m de comprimento

### 3.2.2 Montagem do sistema de pré-esforço

Passou-se o fio de pré-esforço por um tubo de aço compreendido entre duas chapas de aço furadas ao centro. O tubo possui 50 mm de diâmetro e 750 mm de comprimento; as chapas são de 100 x 100 x 20 mm com um furo centrado de 20 mm de diâmetro.

Após o posicionamento do fio de pré-esforço, passaram-se os fios de condutores de cobre por dois furos de 7 mm existentes no tubo de aço e situados a 25 mm de cada extremidade, de modo a tornar estes fios acessíveis. Seguidamente, colocou-se uma célula de carga que, por sua vez, foi ligada a um *data logger*, permitindo, desta forma, quantificar o pré-esforço aplicado. O tensionamento do fio de aço foi feito com recurso a um macaco hidráulico e a uma bomba manual.

Para finalizar, o fio de pré-esforço foi fixado nas suas extremidades por dois cilindros com cunhas cónicas e foi colocada uma chapa de 100 x 100 x 20 mm por baixo de cada uma das chapas que comprimem o tubo de aço. Outras duas chapas iguais às anteriores foram colocadas por baixo do macaco hidráulico para manter todo o sistema horizontal.

Na Figura 3.2 encontra-se esquematizado o sistema de pré-esforço e na Figura 3.3 pode-se visualizar, de uma perspectiva global, todos os equipamentos utilizados para a execução deste ensaio.

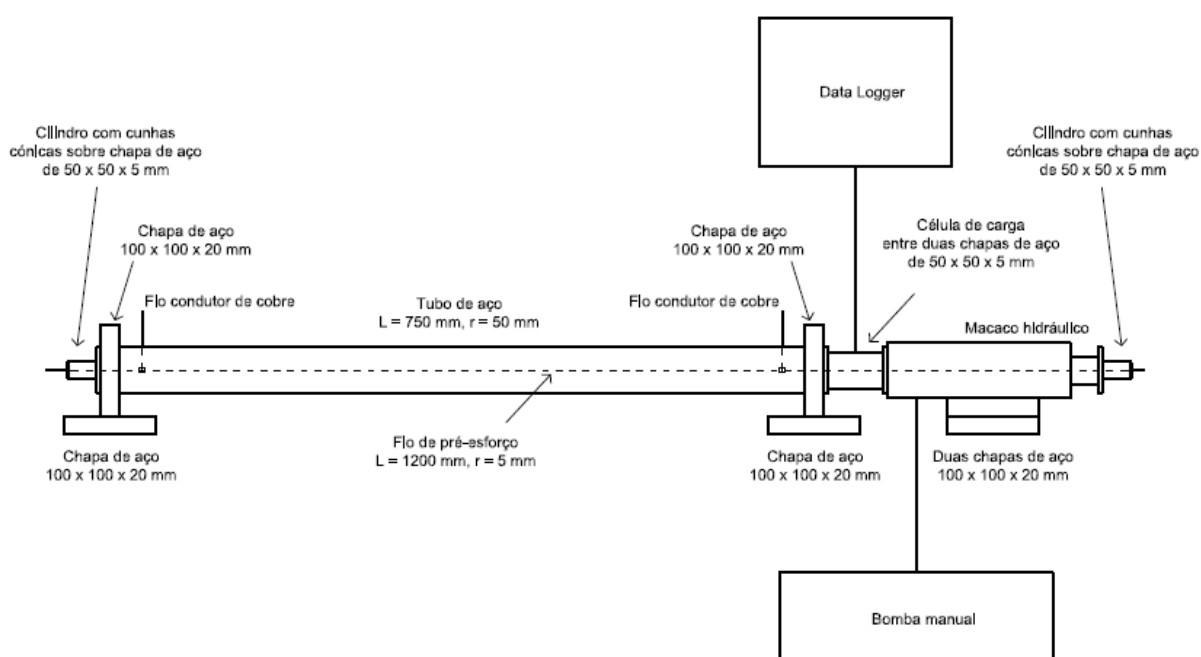


Figura 3.2 - Esquematização do sistema de pré-esforço utilizado para o ensaio feito no DEE

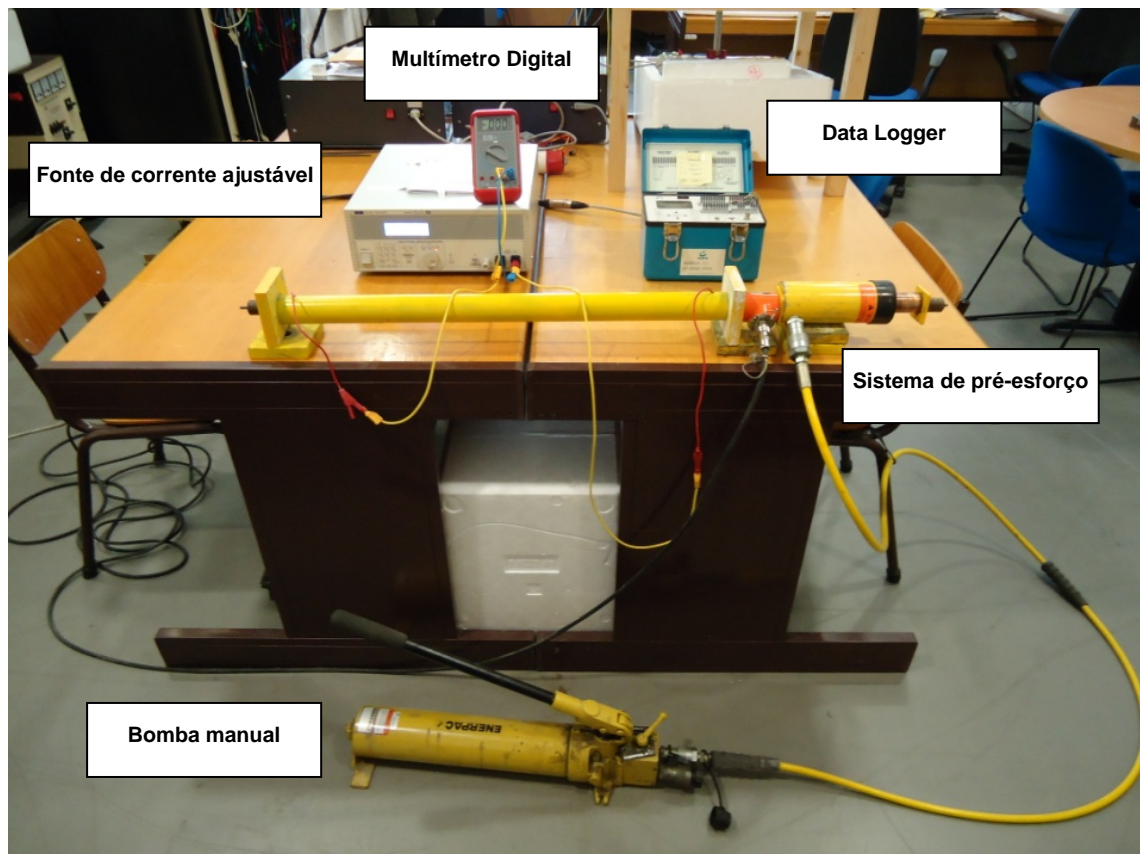


Figura 3.3 - Vista global de todos os equipamentos usados para o ensaio feito no DEE

### 3.2.3 Ligação do sistema eléctrico ao fio de pré-esforço

Os dois fios condutores de cobre foram ligados a uma fonte de corrente ajustável da marca *TTi* [43], modelo QPX1200L, que foi utilizada para injectar uma corrente contínua de intensidade conhecida no fio de pré-esforço. Por fim, um multímetro digital da marca *Iso-Tech* [21], modelo IDM 91E, foi ligado à fonte de corrente ajustável para medir a tensão eléctrica correspondente. A ligação deste sistema pode ser vista na Figura 3.4.

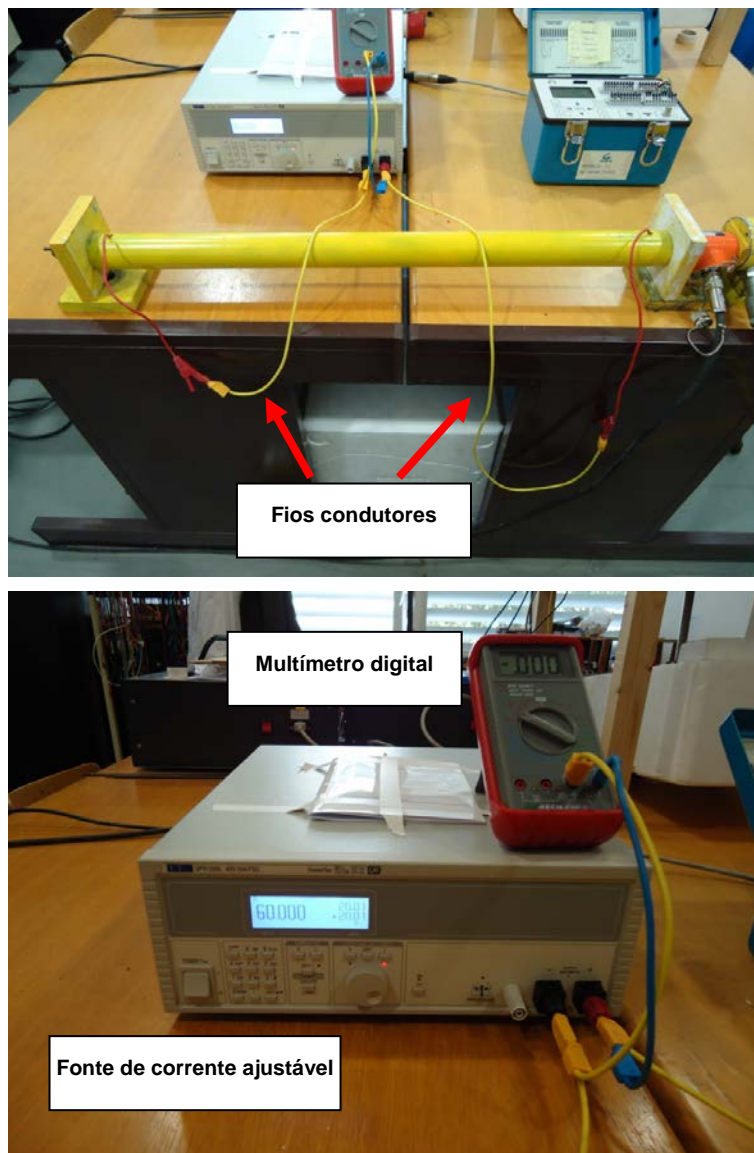


Figura 3.4 - Ligação do sistema eléctrico

### 3.3 Fundamentos teóricos

Este ensaio tem por objectivo obter uma recta de calibração que relaciona, directamente, a resistência eléctrica em função da força de tensionamento aplicada ao fio de pré-esforço utilizado.

De acordo com [48], a resistência eléctrica de um fio condutor, neste caso, o fio de pré-esforço, é dada pela Equação (3.1)

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (3.1)$$

onde  $R$  é a resistência eléctrica do fio,  $\rho$  a sua resistividade,  $L$  o seu comprimento e  $A$  a sua secção transversal. Nesta equação admite-se que a corrente eléctrica é injectada nas extremidades do fio de pré-esforço. Porém, no presente ensaio experimental, os fios condutores foram enrolados ao fio de pré-esforço, distando 700 mm um do outro. Portanto, neste caso, em particular, o valor de  $L$  não é igual ao comprimento do fio, mas 700 mm.

O alongamento do fio de pré-esforço traduz-se num aumento da resistência eléctrica, segundo a Equação (3.2). De igual modo, o aumento da temperatura também se traduz num aumento da resistência eléctrica, de acordo com a Equação (3.3).

$$R = R_0 \frac{(1 + \varepsilon)}{(1 - \nu\varepsilon)^2} \quad (3.2)$$

$$R = R_0 \frac{(1 + \alpha\Delta T)}{(1 - \alpha\Delta T)^2} \quad (3.3)$$

$R$  é a resistência eléctrica,  $R_0$  é a resistência eléctrica inicial,  $\varepsilon$  é a extensão sofrida pelo fio de pré-esforço,  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear do aço e  $\Delta T$  é a variação de temperatura sofrida pelo fio de pré-esforço.

A variação unitária da resistência eléctrica não é linear, de acordo com a Equação (3.4). No entanto, essa mesma variação pode ser aproximada a uma recta da seguinte forma:

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \frac{1 + \varepsilon}{(1 - \nu\varepsilon)^2} - 1 = \frac{1 + \varepsilon - (1 - \nu\varepsilon)^2}{(1 - \nu\varepsilon)^2} = \frac{1 + \varepsilon - 1 - (\nu\varepsilon)^2 + 2\nu\varepsilon}{1 + (\nu\varepsilon)^2 - 2\nu\varepsilon} \quad (3.4)$$

Desprezando o termo quadrático da expressão anterior, obtém-se, então, a Equação (3.5).

$$\frac{R - R_0}{R_0} \approx \frac{\varepsilon + 2\nu\varepsilon}{1 - 2\nu\varepsilon} \approx \varepsilon + 2\nu\varepsilon = (1 + 2\nu)\varepsilon \quad (3.5)$$

Sendo  $\nu = 0,3$  para o aço, a variação unitária da resistência eléctrica em função do pré-esforço aplicado é de  $(R - R_0) / R_0 \approx 1,6 \varepsilon$ .

### 3.4 Procedimento experimental

Para se obter a expressão que relaciona a resistência eléctrica com o pré-esforço aplicado, começou-se por injectar uma corrente contínua de intensidade conhecida no fio de pré-esforço, estando este num estado de tensão mecânica nula. Seguidamente, leu-se no multímetro digital o valor da tensão eléctrica correspondente. Utilizaram-se correntes com intensidades de 5 A, 10 A, 20 A e 40 A, recorrendo à fonte de corrente ajustável. Após a obtenção das tensões eléctricas,  $U$ , resultantes das quatro medições, utilizou-se a lei de *Ohm* para calcular os valores correspondentes da resistência eléctrica, segundo a Equação (3.6)

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.6)$$

onde  $U$  é a tensão eléctrica e  $I$  a intensidade da corrente injectada.

Procedeu-se à calibração do *data logger* e tensionou-se o fio de pré-esforço até 20 kN com incrementos de carga de 5 kN. Para cada um dos quatro patamares de carga (5 kN, 10 kN, 15 kN e 20 kN) repetiram-se, da mesma forma, as quatro leituras da tensão eléctrica que foram efectuadas para o estado de tensão mecânica nula do fio de pré-esforço.

Salienta-se que não foi possível obter a curva de calibração experimental que relaciona a resistência eléctrica com a variação de temperatura, devido à falta de meios e de equipamentos.

### 3.5 Registo e análise de resultados

#### 3.5.1 Curva de calibração experimental

Nas Tabela 3.1 e Tabela 3.5 encontram-se os valores da tensão eléctrica registada no fio de pré-esforço para o estado de tensão mecânica nula e para as várias fases de carregamento. Nas mesmas tabelas são apresentadas, também, as respectivas intensidades de corrente utilizadas e os valores correspondentes da resistência eléctrica calculada.

**Tabela 3.1 - Valores de  $U$ ,  $I$  e  $R$  para 0 kN**

$U$ [V]	$I$ [A]	$R$ [ $\Omega$ ]
0,333	5	0,0666
0,675	10	0,0675
1,347	20	0,0674
2,540	40	0,0635

**Tabela 3.2 - Valores de  $U$ ,  $I$  e  $R$  para 5 kN**

$U$ [V]	$I$ [A]	$R$ [ $\Omega$ ]
0,287	5	0,0574
0,607	10	0,0607
1,276	20	0,0638
2,300	40	0,0575

**Tabela 3.3 - Valores de  $U$ ,  $I$  e  $R$  para 10 kN**

$U$ [V]	$I$ [A]	$R$ [ $\Omega$ ]
0,271	5	0,0542
0,540	10	0,0540
1,085	20	0,0543
2,180	40	0,0545

**Tabela 3.4 - Valores de  $U$ ,  $I$  e  $R$  para 15 kN**

$U$ [V]	$I$ [A]	$R$ [ $\Omega$ ]
0,308	5	0,0616
0,608	10	0,0608
1,218	20	0,0609
2,440	40	0,0610

**Tabela 3.5 - Valores de  $U$ ,  $I$  e  $R$  para 20 kN**

$U$ [V]	$I$ [A]	$R$ [ $\Omega$ ]
0,337	5	0,0674
0,671	10	0,0671
1,368	20	0,0684
2,510	40	0,0628



Na Figura 3.5 encontra-se a curva de calibração de  $R$  e  $F_{célula}$  obtida experimentalmente, e na Tabela 3.6 encontra-se a média dos valores da resistência eléctrica resultantes das quatro medições efectuadas para cada uma das fases de carregamento.

Pode-se constatar que a resistência eléctrica não varia linearmente de acordo com a Equação (3.5). De seguida, será calculada a curva de calibração teórica que se esperava obter de modo a averiguar quais as razões que levaram à obtenção de valores experimentais de resistência eléctrica tão dispersos.

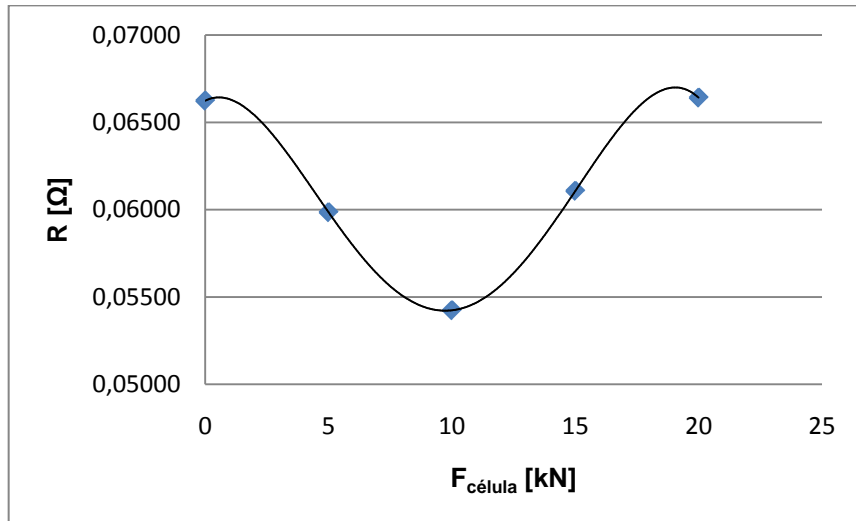


Figura 3.5 - Curva de calibração de  $R$  e  $F_{célula}$  obtida experimentalmente

Tabela 3.6 - Valores médios da resistência eléctrica para cada fase de carregamento

F [kN]	0	5	10	15	20
R [Ω]	0,06624	0,05985	0,05424	0,06108	0,06641

### 3.5.2 Curva de calibração teórica

Admitindo  $0,06624 \Omega$  para a resistência eléctrica inicial, consegue-se calcular a resistividade eléctrica através da Equação (3.1) para  $L = 0,7 \text{ m}$  e  $A = 19,635 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ , obtendo-se o valor  $\rho = 1,858 \times 10^{-6} \Omega \text{m}$ .

Na Figura 3.6 encontra-se a recta de calibração que se esperava obter e na Tabela 3.7 encontram-se os valores teóricos da resistência eléctrica obtidos em função do pré-esforço aplicado, através da Equação (3.5).

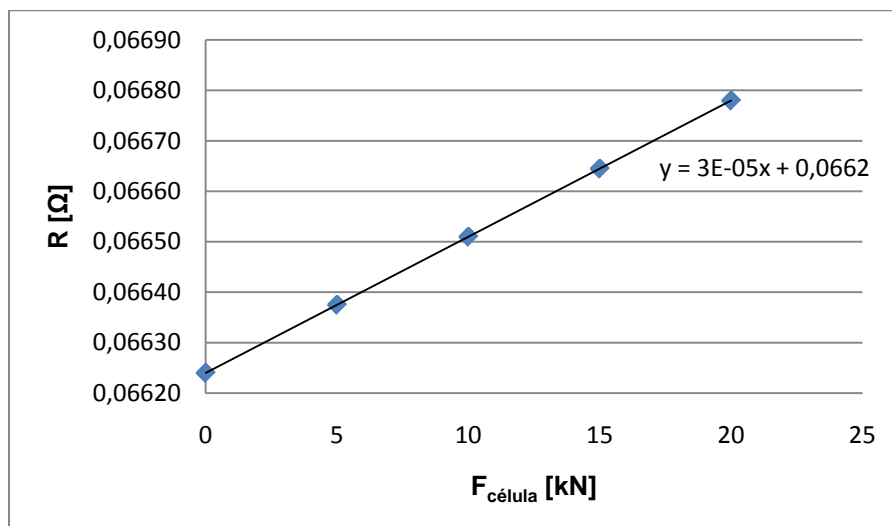


Figura 3.6 - Recta de calibração de  $R$  e  $F_{\text{célula}}$  esperada

Tabela 3.7 - Variação da resistência eléctrica com o pré-esforço aplicado

F [kN]	$\mu\epsilon$	R [ $\Omega$ ]
0	0	0,06624
5	1273	0,06637
10	2546	0,06651
15	3820	0,06664
20	5093	0,06678

### 3.5.3 Análise dos resultados teóricos e experimentais

Pode-se concluir, da Tabela 3.7 que a curta distância entre os fios condutores (700 mm) resulta em deformações muito pequenas no fio de pré-esforço, deformações essas que não contribuem para um aumento significativo da sua resistência eléctrica. Contudo, o factor mais condicionante é a baixa resistividade eléctrica do fio de aço que conduz à necessidade de quantificar as variações da resistência eléctrica até à quinta casa decimal, de modo a se obter algum rigor nos valores calculados.

Não se obteve uma variação linear da resistência eléctrica em função do pré-esforço aplicado, devido aos erros introduzidos pelas flutuações da própria rede eléctrica nos valores medidos da tensão eléctrica,  $U$ . Estas flutuações, da ordem dos 50 mV, apesar de serem pequenas, introduzem erros até à segunda casa decimal dos valores calculados experimentalmente da resistência eléctrica (ver Tabela 3.6). Como são necessárias, pelo menos, cinco casas decimais para medir as variações de resistência eléctrica, conclui-se que estas oscilações comprometem a viabilidade do método experimental adoptado.

### **3.6 Considerações finais**

A resistência eléctrica varia infinitesimalmente devido às características do próprio fio de pré-esforço, dificultando a execução deste ensaio na medida em que é exigido um elevado grau de precisão para quantificar essas variações.

A viabilidade do método experimental adoptado é comprometida pelas flutuações da rede eléctrica usada para alimentar a fonte de corrente ajustável, sendo necessário recorrer a uma fonte de alimentação externa que não possua tais flutuações ou, então, a uma fonte de alimentação cujas flutuações introduzam erros inferiores à quinta casa decimal nos valores de resistência eléctrica.



## 4 ENSAIO COM ULTRASSONS

### 4.1 Objectivo

Com base no trabalho de *Chaki & Bourse* [3] pretende-se obter, experimentalmente, uma curva de calibração que relacione a variação da velocidade de propagação de ondas ultra-sonoras com o valor do pré-esforço aplicado a um fio de aço com 5 mm de diâmetro e 1,2 m de comprimento.

Para esse efeito, foram utilizados dois transdutores piezoelétricos em modo emissor/receptor e um equipamento de ultra-sons para medir o tempo decorrido,  $\Delta t$ , entre os ecos das ondas ultra-sonoras captadas pela sonda receptora. Uma vez que não era possível medir  $\Delta t$  com rigor, apenas com o referido equipamento de ultra-sons, usou-se um osciloscópio digital para adquirir os sinais das sondas emissora e receptora. Este último procedimento permitiu medir o tempo decorrido,  $\Delta t$ , entre o sinal da sonda emissora e o sinal da sonda receptora, com uma precisão de nanossegundos. Desta forma consegue-se determinar a variação da velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras, já que esta se relaciona com o atraso da onda que é emitida pela sonda emissora e da onda que é recebida pela sonda receptora.

Foram levados a cabo alguns testes preliminares, tendo-se validado esta metodologia ao mostrar que é possível medir  $\Delta t$  com mais rigor.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Infelizmente, o equipamento de excitação dos transdutores piezoelétricos avariou-se, não tendo sido possível concluir este ensaio.

### 4.2 Trabalhos preparatórios

#### 4.2.1 Escolha do transdutor piezoelétrico

Inicialmente, optou-se por usar um transdutor de contacto da marca *Olympus* [31] com 12 mm de diâmetro. As características desta sonda encontram-se na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Características da sonda com 12mm de diâmetro**

Marca	Modelo	Frequência [MHz]	Diâmetro [mm]
Olympus	C541-SM	5	12

Dado que o fio de pré-esforço a ser testado possui apenas 5 mm de diâmetro, a sua secção transversal é muito menor quando comparada com a área de contacto do transdutor que tem 12 mm de diâmetro. De modo a transmitir a maior quantidade possível de som emitido pelo transdutor ao fio de pré-esforço, foram torneados dois calços em *PMMA* (Polimetil-metacrilato, i.e., acrílico) no laboratório de tecnologia do DEMI (ver Figura 4.1). Estes calços são mostrados na Figura 4.2 e as suas dimensões podem ser visualizadas no Anexo 2.



**Figura 4.1 - Torno mecânico usado no fabrico dos calços em PMMA**



**Figura 4.2 - Calços em PMMA**

O calço ilustrado à esquerda, na Figura 4.2, varia gradualmente de secção ao longo de três patamares, terminando num patamar cuja secção transversal é idêntica à secção do transversal do fio de pré-esforço. Este calço possui uma superfície rugosa nos dois primeiros patamares e reentrâncias nos respectivos topos. Estas rugosidades e reentrâncias têm a função de atenuar a interferência entre as ondas sonoras emitidas pela sonda e as ondas sonoras reflectidas internamente no calço.

O calço ilustrado à direita, na mesma figura, varia linearmente de diâmetro até atingir as dimensões da secção transversal do fio de pré-esforço, e possui uma superfície lisa.

Estes calços funcionam como um meio de transição para a propagação das ondas sonoras emitidas pela sonda, concentrando-as na secção transversal do fio de pré-esforço (ver Figura 4.3). No entanto, quando ambos os calços foram acoplados ao transdutor que, por sua vez, foi ligado ao equipamento de ultra-sons, registaram-se elevados níveis de ruído sem que se tivesse encostado a sonda ao fio de pré-esforço. Concluiu-se, portanto, que seria inviável usar estes calços porque não

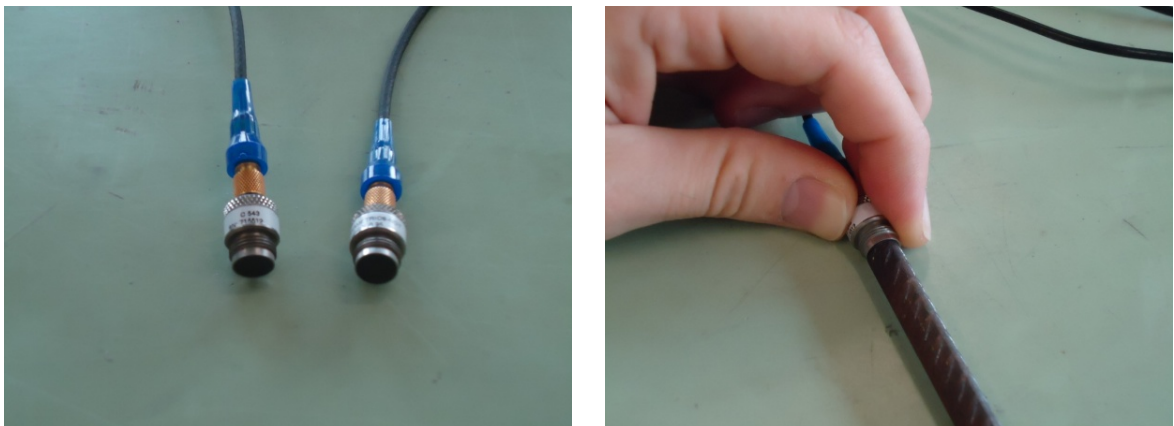
iria ser possível distinguir os ecos de reflexão das ondas nas extremidades do fio de pré-esforço, necessários para quantificar a sua velocidade de propagação.



**Figura 4.3 - Adaptação dos calços ao transdutor com 12 mm de diâmetro**

Como solução alternativa, utilizaram-se transdutores de contacto com um diâmetro de 6 mm, encostando-os directamente ao fio de pré-esforço (ver Figura 4.4). As suas características encontram-se discriminadas na

Tabela 4.2. Estas sondas, apesar de serem destinadas à variante de ultra-sons designada *TOFD*<sup>4</sup>, revelaram um bom desempenho no funcionamento em modo emissor/receptor.



**Figura 4.4 - Sondas com 6 mm de diâmetro**

**Tabela 4.2 - Características da sonda com 6 mm de diâmetro**

Marca	Modelo	Frequência [MHz]	Diâmetro [mm]
Olympus	C543-SM	5	6

<sup>4</sup> *Time-of-Flight Diffraction*: Técnica usada na detecção de defeitos, num dado material, através do tempo de percurso das ondas difractadas pelas extremidades desses mesmos defeitos [47]

#### 4.2.2 Sistema de pré-esforço e sistema de ultra-sons

O sistema adoptado para aplicar o pré-esforço é idêntico ao que foi usado no ensaio experimental realizado no DEE (ver secção 3.2.2).

Em relação ao sistema de ultra-sons, este é composto pelos dois transdutores piezoeléctricos mencionados na

Tabela 4.2, por um equipamento de ultra-sons da marca *Krautkramer* [23], modelo USM35X, e por um osciloscópio digital da marca *Tektronix* [42], modelo TPS2024. Foi feita uma ligação em paralelo entre o osciloscópio e as duas sondas, de modo a se poder registar a sinusóide da onda ultra-sonora emitida e da onda ultra-sonora recebida. A sonda emissora e a sonda receptora foram ligadas, respectivamente ao canal 1 (C1) e ao canal 2 (C2) do osciloscópio. Na Figura 4.5 pode-se visualizar o esquema de montagem de todos os aparelhos e equipamentos referidos.

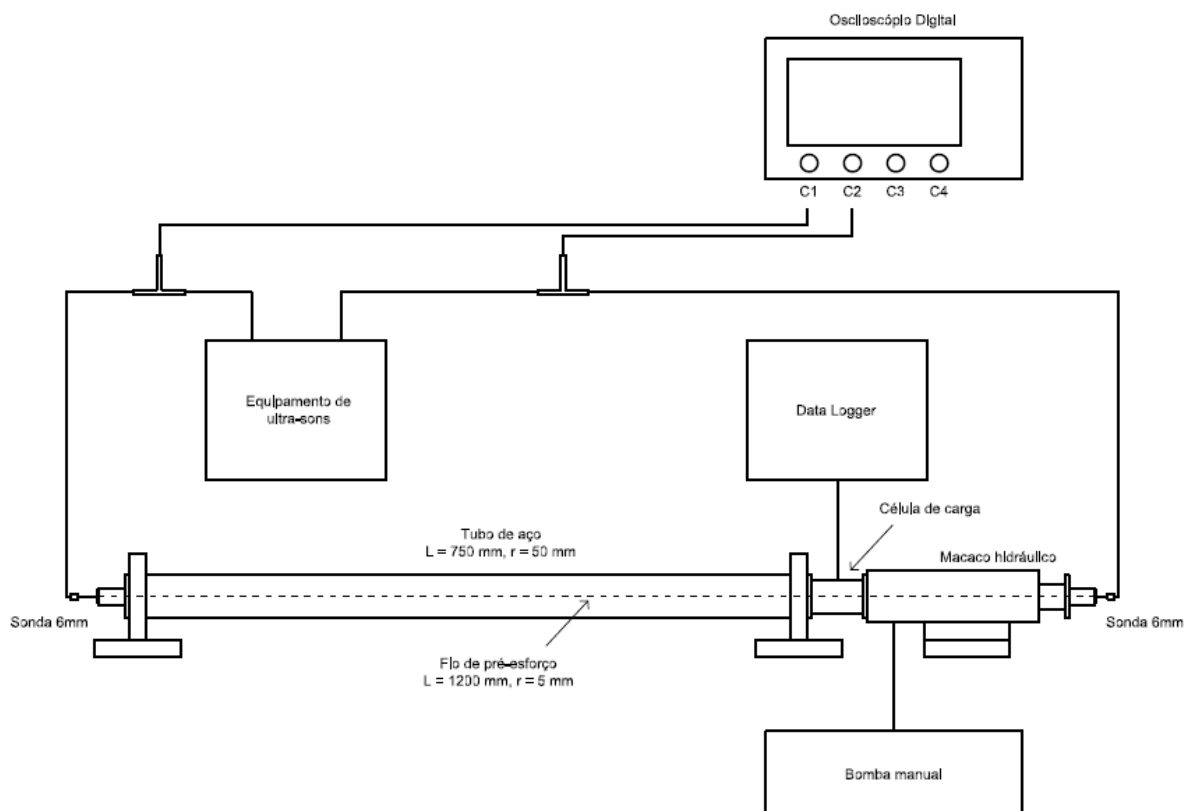


Figura 4.5 - Esquema de ligação do sistema de ultra-sons

#### 4.2.3 Determinação da velocidade de propagação das ondas sonoras

Antes de se prosseguir com o ensaio proposto, foi necessário determinar a velocidade de propagação correcta das ondas sonoras emitidas no fio de pré-esforço, para um estado de tensão nula.

Dado que as sondas de *TOFD* produzem ondas longitudinais, foi necessário determinar a velocidade longitudinal dessas ondas para, depois, inserir o seu valor no equipamento de ultra-sons.



#### 4.2.3.1 Velocidade teórica

O valor teórico da velocidade longitudinal do som no aço pode ser obtido através da Equação (4.1) [38]

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (4.1)$$

em que  $V_L$  é a velocidade longitudinal da onda ultra-sonora,  $E = 200$  GPa é o módulo de elasticidade do aço,  $\nu = 0,3$  é o coeficiente de Poisson do aço e  $\rho = 7850$  kg/m<sup>3</sup> é a massa volúmica do aço.

#### 4.2.3.2 Velocidade experimental

A velocidade experimental foi determinada para três fios de aço de 5 mm de diâmetro com comprimentos diferentes, nomeadamente de 250 mm, 500 mm e 1200 mm.

Começou-se por ligar ao equipamento de ultra-sons a sonda emissora e a sonda receptora. Seguidamente, aplicou-se uma fina camada de líquido acoplante na face de cada um dos transdutores, pressionando-os, depois, contra as extremidades dos fios de aço. Foi necessário aplicar o líquido acoplante porque as ondas ultra-sonoras são ondas mecânicas e, como tal, precisam de suporte material para se propagarem. Por fim, ajustou-se o valor da velocidade de propagação inserida no equipamento de ultra-sons até que a distância entre ecos de reflexão consecutivos, mostrados no visor do aparelho, coincidissem com o comprimento do fio de pré-esforço testado.

Os fios de pré-esforço, com 250 mm e 500 mm de comprimento, foram cortados de um dos três fios de pré-esforço fornecidos com 1200 mm. As pontas dos fios escolhidos para este teste de calibração foram previamente cortadas com um torno mecânico de modo a ficarem perpendiculares ao seu eixo longitudinal. Houve, também, a necessidade de garantir que as secções transversais desses fios de pré-esforço ficassem lisas e homogéneas para permitir um perfeito contacto com os transdutores piezoelétricos.

Na Tabela 4.3 encontram-se as dimensões dos referidos fios juntamente com a respectiva velocidade de propagação teórica e experimental. É, também, mostrado o ganho utilizado no equipamento de ultra-sons para visualizar os picos dos ecos registados.

**Tabela 4.3 - Velocidades de propagação em vários fios de aço com 5mm de diâmetro**

$\phi$ [mm]	L [mm]	$V_{\text{teórico}}$ [m/s]	$V_{\text{experimental}}$ [m/s]	Ganho [dB]
5	250	5856	4663	50,0
5	500	5856	4663	58,5
5	1200	5856	4823	64,0

Verifica-se que o ganho necessário para visualizar os ecos das ondas reflectidas aumenta com o comprimento do fio de pré-esforço testado, uma vez que o efeito de atenuação das ondas ultra-sonoras também aumenta.

Constata-se uma diferença de, aproximadamente, 1140 m/s entre  $V_{\text{teórico}}$  e  $V_{\text{experimental}}$ . Esta diferença deve-se, possivelmente, ao facto de não se ter tido em conta o tempo de percurso

acrescido das ondas ultra-sonoras dentro das próprias sondas. Por outro lado, existe a possibilidade de se ter medido mal a distância entre os ecos das ondas reflectidas.

### 4.3 Procedimento experimental

Como foi referido no início deste capítulo, o equipamento de ultra-sons avariou-se antes de se ter tido a oportunidade de realizar este ensaio, pelo que, nesta secção, serão apenas mencionados os passos de execução planeados e o método utilizado para obter a curva de calibração esperada para o fio de pré-esforço utilizado.

#### 4.3.1 Medição de $\Delta t$ entre ondas sonoras emitidas e recebidas

Primeiro, procede-se à calibração do equipamento de ultra-sons, introduzindo a velocidade inicial de propagação das ondas ultra-sonoras para o fio de pré-esforço com 1,2 m de comprimento.

Tal como no ensaio experimental anterior, o fio de pré-esforço é tensionado até uma carga limite de 20 kN com incrementos de 5 kN, depois de se calibrar o *data logger*. Para cada um dos quatro patamares de carga (5 kN, 10 kN, 15 kN e 20 kN), pressionam-se as sondas contra as extremidades do fio, após ter sido aplicada uma fina camada de líquido acoplante na face dos dois transdutores. Por fim, efectuam-se três leituras do desfasamento,  $\Delta t$ , entre o sinal da onda ultra-sonora emitida e o sinal da onda ultra-sonora recebida, medido em microssegundos, com recurso ao osciloscópio digital.

#### 4.3.2 Cálculo da curva de calibração

A curva de calibração que se pretende obter, relaciona a variação unitária da velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras com o valor do pré-esforço aplicado ao fio testado.

A expressão que permite calcular essa variação foi obtida fazendo-se algumas considerações que são explicadas de seguida.

Na Figura 4.6 pode-se evidenciar que o comprimento total do fio de pré-esforço,  $L_t$ , é dado pela soma do comprimento entre cunhas,  $L_s$ , com os comprimentos situados fora destas,  $L_u$ .

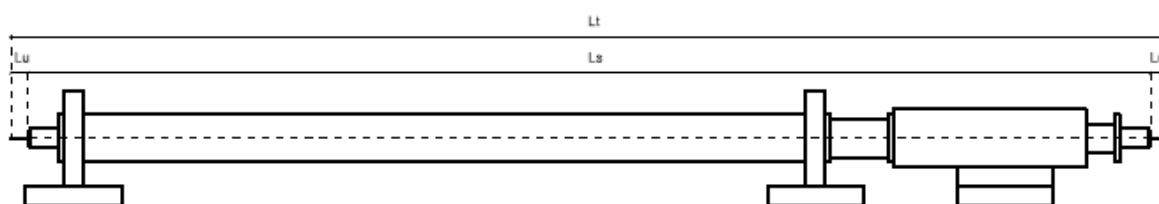


Figura 4.6 - Comprimentos do fio de aço sujeitos a tensões nulas e não nulas

Para um estado de tensão nula, o comprimento total do fio de pré-esforço é dado pela Equação (4.2) e a velocidade de propagação inicial das ondas ultra-sonoras é dada pela Equação (4.3).

$$L_{t_0} = L_{s_0} + 2L_u \quad (4.2)$$

$$V_0 = \frac{Lt_0}{\Delta t_0} \quad (4.3)$$

Já para um estado de tensão diferente de zero, o comprimento total do mesmo fio de pré-esforço é dado pela Equação (4.4). A respectiva velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras é dada pela Equação (2.20) (ver secção 2.5.3), e o tempo decorrido entre o sinal da onda emitida e o sinal da onda recebida é dado pela Equação (4.6).

$$Lt_\sigma = Ls_0(1 + \varepsilon) + 2Lu \quad (4.4)$$

$$V_\sigma = V_0(1 + K\sigma) \quad (4.5)$$

$$\Delta t_t = \frac{2Lu}{V_0} + \frac{Ls_0(1 + \varepsilon)}{V_\sigma} = \frac{2Lu}{V_0} + \frac{Ls_0(1 + \varepsilon)}{V_0(1 + K\sigma)} \quad (4.6)$$

A Equação (4.6) pode ser reescrita da seguinte forma, obtendo-se, consequentemente, a Equação (4.7).

$$K\sigma = \left( \frac{Lt_\sigma - \Delta t_t V_0}{\Delta t_t V_0 - 2Lu} \right) \quad (4.7)$$

A variação unitária da velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras é expressa pela Equação (4.8).

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_\sigma - V_0}{V_0} = K\sigma \quad (4.8)$$

Substituindo a Equação (4.7) na equação anterior, chega-se à expressão utilizada para o cálculo do rácio da variação da velocidade de propagação, dada pela Equação (4.9).

$$\frac{V_\sigma - V_0}{V_0} = \left( \frac{Lt_\sigma - \Delta t_t V_0}{\Delta t_t V_0 - Lu} \right) \quad (4.9)$$

Segundo *Chaki e Bourse* [3], espera-se obter uma curva de calibração do mesmo tipo que aquela que se encontra na Figura 2.33 (ver alínea 2.5.3.3).



## 5 ENSAIOS POR MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

Tal como foi referido no subcapítulo 2.3, uma corda tensionada entre dois pontos fixos possui uma determinada frequência de vibração que é dada em função do seu comprimento, da sua massa distribuída e do valor da força de tracção aplicada.

No âmbito desta dissertação, pretende-se determinar a frequência de vibração fundamental de um fio de pré-esforço cujas propriedades mecânicas e geométricas são conhecidas para, então, calcular a força de pré-esforço aplicada com recurso à equação da corda vibrante (i.e. Equação (2.15)). Foi utilizado, para esse efeito, o aparelho de medição comercial *Digiforce* [1], um laser e um acelerómetro.

### 5.1 Ensaio realizados com o *Digiforce*

#### 5.1.1 Objectivo

Pretende-se desenvolver um sistema que permita quantificar a força aplicada em fios de pré-esforço, durante o processo de fabrico de elementos pré-tensionados, antes da fase de betonagem. Os testes realizados tiveram lugar na fábrica da Secil Prébetão, sediada no Alto Estanqueiro - Jardia. Escolheu-se o equipamento comercial de medição de forças *Digiforce* [1], como elemento principal do sistema acima proposto. As medições efectuadas estão, no entanto, limitadas a elementos com comprimentos até 10,0 m. Visto que os fios pré-esforçados nas pistas da fábrica possuem comprimentos muito superiores a 10,0 m, há a necessidade de seccioná-los de modo a limitar o comprimento de medição do aparelho.

Foram realizados quatro ensaios laboratoriais num fio de pré-esforço de 5,0 mm de diâmetro, com 2,5 m de comprimento, fornecido pela Secil Prébetão, para testar a precisão do *Digiforce* [1] e, também, para estudar vários mecanismos utilizados na limitação do vão desse mesmo fio. Por fim, os mecanismos que mostraram ser mais precisos e fáceis de implementar foram testados na fábrica.

#### 5.1.2 Testes laboratoriais

Foi utilizado um fio de pré-esforço de 5,0 mm de diâmetro e 2,5 m de comprimento para a execução de quatro ensaios realizados no laboratório de estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Estes ensaios experimentais foram executados no pórtico que se encontra no laboratório, e que se ilustra na Figura 5.1. Na mesma figura pode-se observar, ainda, os equipamentos de medição e o sistema de pré-esforço adoptados. O primeiro ensaio é um teste de controlo, sendo os restantes destinados a avaliar a eficácia de três mecanismos distintos utilizados para reduzir o vão do fio de pré-esforço. Em cada um destes quatro ensaios, avaliou-se a precisão do *Digiforce* [1], comparando os valores obtidos pelo aparelho com os valores registados por uma célula de carga, para várias fases de carregamento.



Figura 5.1 – Montagem do sistema para a execução dos ensaios laboratoriais no DEC

#### 5.1.2.1 Montagem do sistema de ensaio

Começou-se por posicionar o fio de pré-esforço em dois orifícios nivelados existentes nos perfis metálicos verticais que compõem o pórtico. Seguidamente, fixou-se o fio colocando na sua extremidade direita um cilindro com duas cunhas cónicas sobre uma chapa de aço de 50 x 50 x 5 mm com um furo centrado de 7 mm (ver Figura 5.2).



Figura 5.2 - Fixação do fio de pré-esforço com 2,5 m na extremidade direita

Na extremidade esquerda do fio foi montada uma célula de carga da marca *TML* [44], modelo CLC-50kNA, com uma carga máxima de 50 kN sobre uma chapa de aço idêntica à da Figura 5.2. Sobre a célula de carga (ver Figura 5.3) foi colocada uma segunda chapa de aço e, depois, um macaco hidráulico da marca *Enerpac* [9], modelo RCH-123, com uma carga máxima de 12 ton. Uma terceira chapa de aço foi posta sobre o macaco hidráulico, seguindo-se um cilindro com cunhas cónicas, idêntico ao da Figura 5.2. Deixou-se uma folga entre a última chapa de aço e o cilindro para permitir a remoção deste após a realização dos ensaios. Por fim, ligou-se ao macaco hidráulico um

manómetro e a este, por sua vez, uma bomba manual através de uma mangueira. Tanto o manómetro como a bomba manual são, também, da marca *Enerpac* [9].

Na Figura 5.3 encontram-se os equipamentos montados de acordo com a sequência acima descrita.

Por razões de segurança, colocou-se um painel à frente de cada uma das extremidades do fio de pré-esforço, e um outro na parte anterior do pórtico (ver Figura 5.4).



**Figura 5.3 - Montagem do sistema de pré-esforço e de leitura**



**Figura 5.4 - Posicionamento dos painéis de protecção**

O próximo passo consistiu na montagem de dois extensómetros da marca *TML* [44], modelo *FLK 6-11-3L*, nas imediações do perfil vertical situado à direita do pórtico. Estes extensómetros foram colados ao fio de pré-esforço de forma a ficarem diametralmente opostos, de acordo com a seguinte sequência de trabalhos:

- Preparou-se, previamente, a superfície do fio de pré-esforço, usando uma lima para remover quaisquer rugosidades e impurezas, de modo a homogeneizá-la;
- Limpou-se a superfície limada com algodão embebido em álcool e deixou-se secar;

- Aplicou-se uma cola de cianoacrilato na parte inferior dos extensómetros, alinhando-os com o eixo do fio. Com o auxílio de uma folha de plástico, fez-se pressão na parte superior dos extensómetros para os fixar firmemente;
- Por fim, os fios condutores dos dois extensómetros foram atados com fita adesiva ao fio de pré-esforço, para evitar que estes fossem danificados acidentalmente.

Na Figura 5.5 podem-se observar os extensómetros instalados após a execução dos trabalhos atrás descritos.



**Figura 5.5 - Montagem dos extensómetros**

Os extensómetros, depois de montados, foram ligados a um *data logger* da marca *Vishay Micro Measurements* [15], modelo P3. Cada um deles foi ligado em um quarto de ponte, através de uma ligação a três fios. Um dos extensómetros foi ligado ao canal 1, o outro ao canal 4 e a célula de carga foi ligada ao canal 2 em ponte completa (ver Figura 5.6).



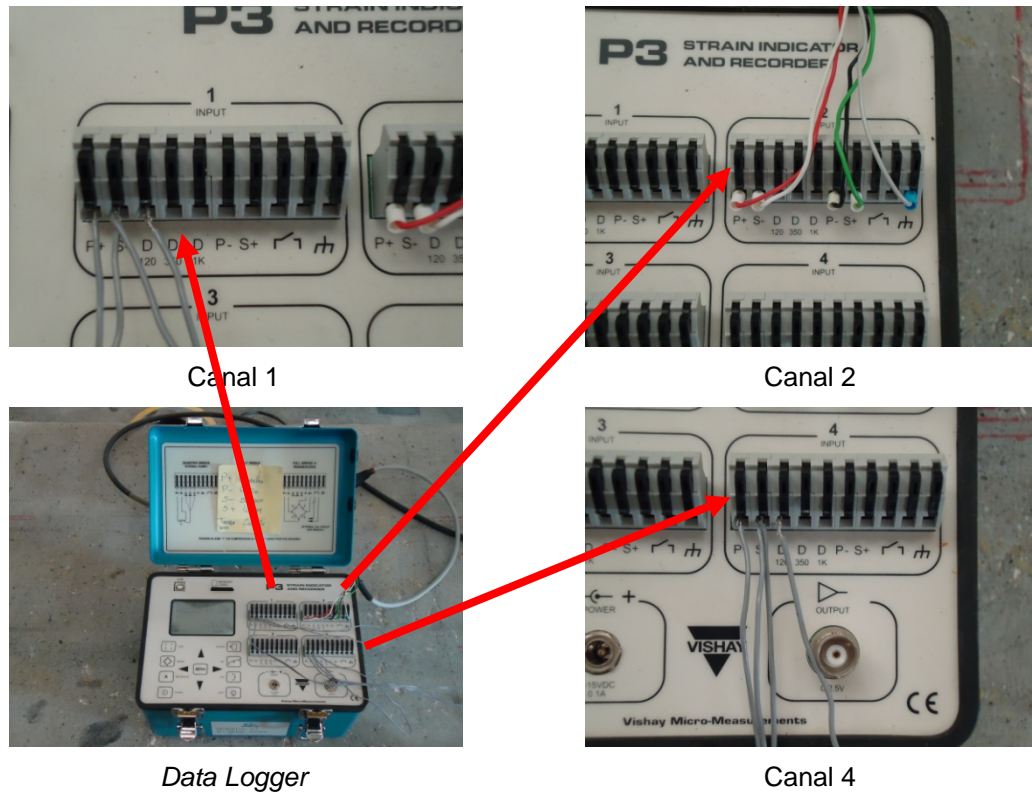


Figura 5.6 - Ligação dos extensómetros e da célula de carga ao *data logger*

### 5.1.2.2 Ensaio 1: Ensaio de controlo

O presente ensaio de controlo teve como função averiguar a precisão das leituras efectuadas pelo *Digiforce* [1], para uma situação idêntica à de uma corda vibrante que se encontra presa nas suas extremidades. Pretende-se, com isto, estabelecer uma ordem de grandeza dos erros de medição cometidos para, posteriormente, os poder comparar com erros de leitura introduzidos pelos sistemas utilizados para limitar o vão do fio de pré-esforço.

O fio de pré-esforço foi tensionado até uma carga limite de 20 kN, com o auxílio do macaco hidráulico e da bomba manual. O valor máximo da carga aplicada foi obtido a partir da Equação (5.1)

$$F_{max} = 0,8 \times f_{puk} \times \pi \times \frac{\phi^2}{4} \quad (5.1)$$

em que  $F_{max}$  é a força máxima aplicada ao fio de pré-esforço,  $f_{puk}$  é a tensão de rotura e  $\phi$  é o diâmetro do fio.

Substituindo o valor da tensão de rotura e do diâmetro do fio na equação anterior, respectivamente de 1770 MPa e 5 mm, obteve-se  $F_{max} = 27,8$  kN.

Por razões de segurança, a carga máxima a ser aplicada foi limitada a 20 kN.

Primeiro, calibrou-se o *data logger* de modo a que a célula de carga marcasse uma força igual a zero, e os extensómetros registassem extensões nulas.

O fio de aço foi pré-esforçado com incrementos de carga de 5 kN até 20 kN, com o auxílio da bomba manual e do macaco hidráulico. Durante o processo de aplicação de carga teve-se o cuidado de garantir que o fio se mantivesse centrado nos furos do pórtico por onde passava. Teve-se em

atenção este pequeno detalhe para evitar que a vibração do fio fosse afectada quando se procedesse à leitura dos valores obtidos pelo *Digiforce* [1] (ver Figura 5.7);



**Figura 5.7 - Posicionamento correcto do fio de pré-esforço**

Em cada um dos quatro patamares de carga (5 kN, 10 kN, 15 kN e 20 kN) anotaram-se os valores das extensões dadas pelos dois extensómetros e verificou-se se o valor do carregamento lido na célula de carga correspondia ao valor equivalente da pressão registada no manómetro. Efectuaram-se, também, em cada um dos referidos patamares de carga, três leituras com o *Digiforce* [1]. As medições foram feitas de acordo com os seguintes passos:

- Procedeu-se à calibração do aparelho, introduzindo o comprimento do vão livre do fio de pré-esforço e o valor da sua massa distribuída,  $w$ , em g/m. Para este teste, o vão livre utilizado foi de 2,08 m, sendo este valor dado pela distância entre as faces exteriores do pórtico. A massa distribuída do fio de aço,  $w$ , foi calculada de acordo com a Equação (5.2)

$$w = \pi \times \frac{\phi^2}{4} \times \rho \quad (5.2)$$

onde  $\phi$  é o diâmetro do fio de aço e  $\rho$  é a massa volúmica do aço.

Sendo  $\phi = 5$  mm e  $\rho = 7850$  kg/m<sup>3</sup>, a massa distribuída obtida para o fio de pré-esforço foi de 154 g/m.

- Antes de cada medição, deu-se uma leve pancada no meio do vão livre do fio de pré-esforço com um martelo de aço para o fazer vibrar. O martelo utilizado para este propósito é um acessório que acompanha o *Digiforce* [1];
- Aproximou-se o *Digiforce* [1] ao fio de pré-esforço, no meio do vão, enquanto este vibrava, mantendo o aparelho afastado cerca de 25 mm. Premiu-se na tecla 5 do equipamento, esperou-se até aparecer o valor da força no visor do aparelho, e procedeu-se ao seu registo.

Na secção 5.1.3 apresentam-se os valores registados.

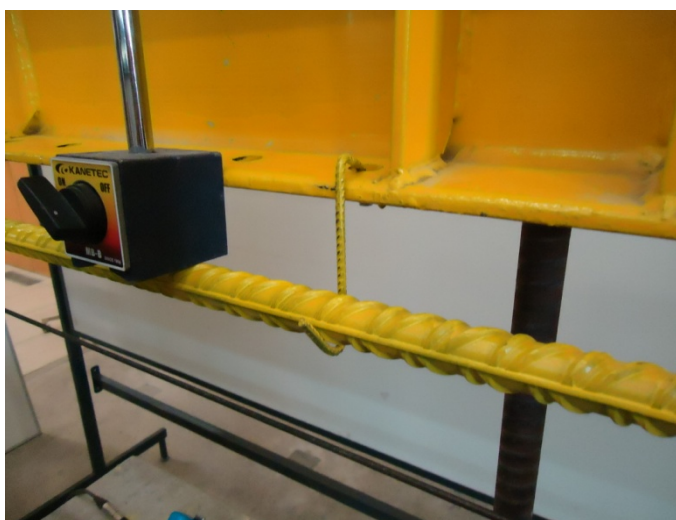
### 5.1.2.3 Ensaio 2: Redução do vão livre com sistema de grampos

Foi desenvolvido um sistema com dois grampos para reduzir o vão livre do fio de pré-esforço. Cada um desses grampos foi soldado a 50 mm das extremidades de um varão de aço com 20 mm de diâmetro e 1,5 m de comprimento. Pretendeu-se com este ensaio testar a fiabilidade deste sistema e, simultaneamente, o seu potencial para ser implementado em fábrica (ver Figura 5.8).



**Figura 5.8 - Sistema de grampos**

O sistema de grampos foi suspenso, a partir do perfil metálico horizontal do pórtico, com recurso a dois ganchos feitos de varões de aço com 4 mm de diâmetro (ver Figura 5.9).



**Figura 5.9 - Ganchos utilizados na suspensão do sistema de grampos**

Por cima do varão de aço soldado aos grampos, foram fixados cinco ímanes da *Kanetec* [22], espaçados de 0,35 m. Estes ímanes tinham a função de amortecer as vibrações do sistema quando fossem feitas as medições com o *Digiforce* [1] (ver Figura 5.10).



Figura 5.10 - Ímanes usados no controlo da vibração do sistema de grampos

O tensionamento do fio de pré-esforço e as leituras da força instalada com o *Digiforce* [1] foram realizados da mesma forma que no Ensaio 1.

O sistema de grampos foi montado e apertado após a primeira etapa do carregamento (5 kN). Teve-se o cuidado de posicionar o referido sistema de modo a não danificar os extensómetros.

#### 5.1.2.4 Ensaio 3: Redução do vão livre com perfis RHS

Experimentou-se reduzir o comprimento do vão livre do fio de pré-esforço, assentando sobre ele dois perfis *RHS* 150 x 150 x 500 mm (ver Figura 5.11).

Este ensaio pode ser separado em duas partes: por um lado, pretendeu-se estudar a fiabilidade deste sistema como meio para reduzir o vão livre do fio de pré-esforço e a sua facilidade de implementação em fábrica; por outro, pretendeu-se avaliar a precisão do *Digiforce* [1] para vãos sucessivamente menores que 1 m (valor mínimo recomendado pelo fabricante). A ideia por detrás deste segundo teste é de simular o uso do *Digiforce* [1] como ferramenta de medição do pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes. Portanto, é de todo o interesse minimizar o comprimento do vão livre, que representa, neste caso, a dimensão longitudinal da abertura a ser feita no betão para expor os fios de pré-esforço.

Testou-se o aparelho para vãos com 0,6 m, 0,4 m e 0,2 m de comprimento. O comprimento dos vãos foi obtido pela soma da distância entre as faces interiores dos dois perfis e os raios dos seus cantos (ver Figura 5.12).

Procedeu-se da mesma maneira que no Ensaio 1, em todos os passos necessários ao tensionamento do fio de pré-esforço e às leituras com o *Digiforce* [1]. A única diferença entre os dois reside no facto de, neste terceiro ensaio, se ter tido em conta o acréscimo de força instalada no fio de aço devido ao peso dos perfis *RHS*. Este acréscimo de força foi lido no *data logger*, quando se aplicou o pré-esforço.





Figura 5.11 - Redução do vão livre com perfis *RHS*

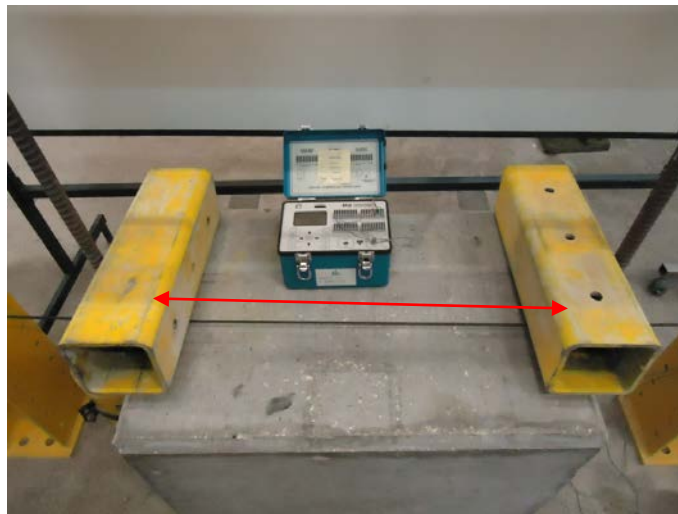


Figura 5.12 - Distância do vão livre entre perfis *RHS* e pormenor dos pontos de fixação

#### 5.1.2.5 Ensaio 4: Redução do vão livre com sistema de cunhas

Este último ensaio é uma variante do Ensaio 3, mudando, somente, o sistema de fixação. Desta vez foi utilizado um sistema composto por chapas de aço e duas cunhas cónicas para reduzir o vão livre do fio de pré-esforço, simulando, ao mesmo tempo, o uso do *Digiforce* [1] como ferramenta de medição do pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes (ver Figura 5.13).

Por baixo do fio foram colocadas chapas de aço sobrepostas de modo a que ficassem distanciadas deste a escassos milímetros, em cada extremidade do vão pretendido. Entre cada conjunto de chapas e o fio de pré-esforço foi encravada uma cunha cónica de modo a fixar firmemente o fio. O comprimento do vão livre foi obtido pela distância entre cunhas, a qual foi medida a partir do centro geométrico de cada uma delas (ver Figura 5.14).

O tensionamento do fio de pré-esforço e as leituras da força instalada com o *Digiforce* [1] foram realizados da mesma forma que no Ensaio 1.

O sistema de cunhas foi implementado após a primeira etapa do carregamento (5 kN).



Figura 5.13 - Redução do vão livre com sistema de cunhas

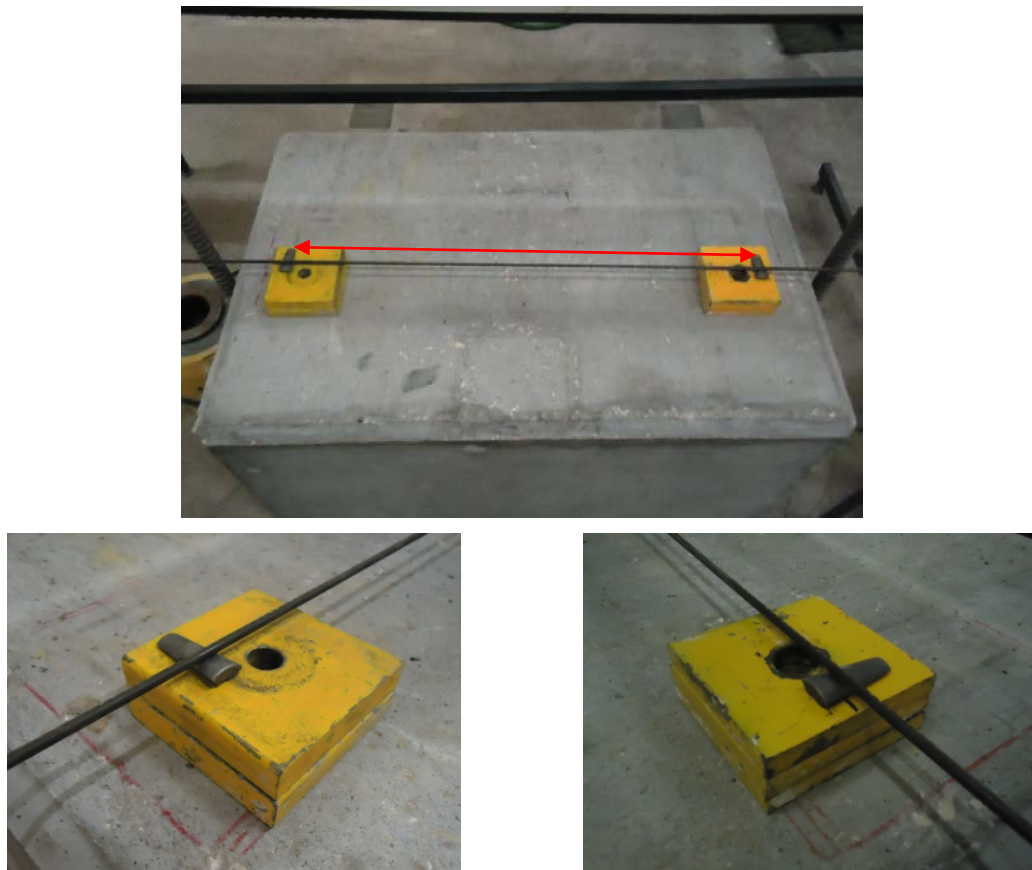


Figura 5.14 - Distância do vão livre entre cunhas e pormenor dos pontos de fixação

### 5.1.3 Registo e análise de resultados

De seguida são apresentados os valores das forças registadas pela célula de carga e da pressão manométrica correspondente, bem como os valores das extensões medidas pelos extensómetros e os valores das forças calculadas pelo *Digiforce* [1].

As leituras feitas no manómetro e os valores das extensões serviram, apenas, para verificar se a célula de carga se encontrava a funcionar correctamente.

A pressão manométrica foi obtida sabendo-se que 120 kN equivalem a 700 bar para a bomba manual utilizada.

Quanto às extensões registadas para cada caso de carga, foi usado o seu valor médio para determinar a força elástica correspondente através da lei de *Hooke*.

#### 5.1.3.1 Ensaio 1: Ensaio de controlo

Na Tabela 5.1 encontram-se os dados registados para o ensaio de controlo e na Tabela 5.2 são comparados as diferenças entre as forças medidas na célula de carga,  $F_{célula}$ , as forças elásticas correspondentes,  $F_{Hooke}$ , e a força média calculada pelo *Digiforce* [1],  $F_{Digiforce}$ .

**Tabela 5.1 - Valores registados no Ensaio 1**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu\text{m}$ ]	
5,0	29	5,15	5,21	5,27	1120	1400
10,0	58	10,58	10,11	10,06	2330	2710
15,0	87	15,87	15,19	14,76	3566	4032
20,0	116	20,33	20,61	21,25	4814	5561

**Tabela 5.2 – Comparação entre  $F_{\text{célula}}$ ,  $F_{\text{Hooke}}$ , e  $F_{\text{Digiforce}}$  para o Ensaio 1**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	$F_{\text{Hooke}}$ [kN]	Diferença	$F_{\text{Digiforce}}$ [kN]	Diferença
5,0	4,95	-1,00%	5,21	4,20%
10,0	9,90	-1,00%	10,25	2,50%
15,0	14,92	-0,53%	15,27	1,82%
20,0	20,37	1,85%	20,73	3,65%

As diferenças entre  $F_{\text{Hooke}}$  e  $F_{\text{célula}}$  não excedem os 2 %, pelo que podem ser desprezados por serem muito pequenos.

As diferenças entre  $F_{\text{Digiforce}}$  e  $F_{\text{célula}}$  não são significativas, situando-se abaixo dos 5 %. Para efeitos práticos, pode-se admitir que a precisão do *Digiforce* [1] é boa para as condições do presente ensaio, conduzindo a resultados fiáveis.

### 5.1.3.2 Ensaio 2: Redução do vão livre com o sistema de grampos

Na Tabela 5.3 encontram-se os dados registados para o Ensaio 2 e na Tabela 5.4 são comparados as diferenças entre as forças medidas na célula de carga,  $F_{\text{célula}}$ , as forças elásticas correspondentes,  $F_{\text{Hooke}}$ , e a força média calculada pelo *Digiforce* [1],  $F_{\text{Digiforce}}$ .

**Tabela 5.3 - Valores registados no Ensaio 2**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu\text{m}$ ]	
5,0	29	5,90	5,87	5,98	1126	1418
10,0	58	11,06	11,02	11,25	2345	2663
15,0	87	16,06	16,22	15,78	3541	4005
20,0	116	20,28	21,38	21,78	4783	5335

**Tabela 5.4 - Comparação entre  $F_{\text{célula}}$ ,  $F_{\text{Hooke}}$ , e  $F_{\text{Digiforce}}$  para o Ensaio 2**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	$F_{\text{Hooke}}$ [kN]	Diferenças	$F_{\text{Digiforce}}$ [kN]	Diferenças
5,0	5,00	0,00%	5,92	18,33%
10,0	9,83	-1,70%	11,11	11,10%
15,0	14,82	-1,20%	16,02	6,80%
20,0	19,87	-0,65%	21,15	5,73%

As diferenças entre  $F_{\text{Hooke}}$  e  $F_{\text{célula}}$  não ultrapassam os 2 % pelo que podem ser desprezadas por serem muito pequenos.

Neste ensaio, constata-se que as diferenças entre  $F_{\text{Digiforce}}$  e  $F_{\text{célula}}$  diminuem com o aumento da força aplicada ao fio de pré-esforço, usando o sistema de grampos. Registou-se uma diferença



máxima de 18,33 % para uma força de 5 kN, e uma diferença mínima de 5,73 % para uma força de 20 kN. Uma vez que na fábrica os fios de pré-esforço são tensionados até 27,8 kN, à partida, a diferença correspondente será ainda menor que 5 %.

Conclui-se, face aos resultados obtidos, que o presente sistema possui potencial para ser implementado em fábrica.

### 5.1.3.3 Ensaio 3: Redução do vão livre com perfis RHS

Nas Tabela 5.5 a Tabela 5.7 são mostrados os dados obtidos para cada um dos três vãos testados no Ensaio 3, usando os perfis RHS para limitar os seus comprimentos.

Na Tabela 5.8 encontram-se as diferenças das forças elásticas,  $F_{Hooke}$ , em relação às forças registadas pela célula de carga,  $F_{célula}$ , para cada um dos vãos testados.

Por fim, na Tabela 5.9 encontram-se as diferenças da força média calculada pelo Digiforce [1],  $F_{Digiforce}$ , em relação às forças registadas pela célula de carga para esses mesmos vãos.

**Tabela 5.5 - Valores registados no Ensaio 3 para um vão de 0,6 m**

$F_{célula}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu$ m]	
5,0	29	5,99	6,14	5,78	1136	1394
10,0	58	11,08	11,13	11,28	2345	2710
15,0	87	16,13	16,14	16,07	3573	4025
20,0	116	20,92	21,39	20,85	4805	5335

**Tabela 5.6 - Valores registados no Ensaio 3 para um vão de 0,4 m**

$F_{célula}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu$ m]	
5,0	29	6,47	6,83	6,53	1175	1359
10,0	58	10,41	11,86	11,69	2380	2670
15,0	87	15,38	17,29	16,27	3600	3976
20,0	116	21,03	21,73	21,31	4832	5283

**Tabela 5.7 - Valores registados no Ensaio 3 para um vão de 0,2 m**

$F_{célula}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu$ m]	
5,0	29	7,27	8,87	11,98	1180	1367
10,0	58	15,81	13,87	13,33	2393	2686
15,0	87	16,74	18,48	19,84	3601	3978
20,0	116	23,43	22,33	24,84	4842	5298

**Tabela 5.8 - Diferença entre  $F_{Hooke}$  e  $F_{célula}$  para o Ensaio 3**

$F_{célula}$ [kN]	L = 0,6 m	Diferença	L = 0,4 m	Diferença	L = 0,2 m	Diferença
5,0	4,97 kN	-0,60%	4,98 kN	-0,40%	5,00 kN	0,00%
10,0	9,93 kN	-0,70%	9,92 kN	-0,80%	9,97 kN	-0,30%
15,0	14,92 kN	-0,53%	14,88 kN	-0,80%	14,88 kN	-0,80%
20,0	19,91 kN	-0,45%	19,86 kN	-0,70%	19,91 kN	-0,45%

**Tabela 5.9 - Diferença entre  $F_{Digiforce}$  e  $F_{célula}$  para o Ensaio 3**

$F_{célula}$ [kN]	L = 0,6 m	Diferença	L = 0,4 m	Diferença	L = 0,2 m	Diferença
5	5,97 kN	19,40%	6,61 kN	32,20%	9,37 kN	87,47%
10	11,16 kN	11,63%	11,32 kN	13,20%	14,34 kN	43,37%
15	16,11 kN	7,42%	16,31 kN	8,76%	18,35 kN	22,36%
20	21,05 kN	5,27%	21,36 kN	6,78%	23,53 kN	17,67%

As diferenças entre  $F_{Hooke}$  e  $F_{célula}$  são menores do que 1 %, pelo que podem ser desprezadas por serem muito pequenas.

Constata-se que as diferenças entre  $F_{Digiforce}$  e  $F_{célula}$  diminuem com o aumento da força aplicada ao fio de pré-esforço, usando os perfis RHS para limitar o comprimento do vão livre.

Analisando as diferenças correspondentes à força de 20 kN, conclui-se que estas são inferiores a 7 % para um vão livre de 0,6 m e de 0,4 m. Porém, quando se limita o fio de pré-esforço apenas em 0,2 m, as diferenças são quase de 18 %, pondo em causa a fiabilidade dos resultados obtidos pelo aparelho de medição. Optou-se por analisar as diferenças obtidas para uma força de 20 kN pelo facto de esta força se aproximar mais do valor do pré-esforço que é aplicado em fábrica.

A partir destes resultados, pode-se concluir que o conceito deste sistema apresenta potencial para ser implementado em fábrica, sendo apenas necessário adaptá-lo às condições da pista onde os fios de pré-esforço se encontram dispostos.

Por fim conclui-se, também, que o *Digiforce* [1] não se adequa como ferramenta de medição directa do valor de pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes. Seria necessário efectuar um rasgo longitudinal com, pelo menos, 0,4 m no betão, de modo a expor os fios de pré-esforço para poderem ser feitas leituras com uma precisão razoável.

#### 5.1.3.4 Ensaio 4: Redução do vão livre com sistema de cunhas

Nas Tabela 5.10 a Tabela 5.12 são mostrados os dados obtidos para cada um dos três vãos testados no Ensaio 4, usando o sistema de cunhas para limitar os seus comprimentos.

Na Tabela 5.13 encontram-se as diferenças das forças elásticas,  $F_{Hooke}$ , em relação às forças registadas pela célula de carga,  $F_{célula}$ , para cada um dos vãos testados.

Por último, na Tabela 5.14 encontram-se as diferenças da força média calculada pelo *Digiforce* [1],  $F_{Digiforce}$ , em relação às forças registadas pela célula de carga para esses mesmos vãos.

**Tabela 5.10 - Valores registados no Ensaio 4 para um vão de 0,6 m**

$F_{célula}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu$ m]	
5,0	29	6,06	6,1	6,08	1175	1364
10,0	58	11,59	11,74	11,15	2378	2668
15,0	87	16,47	16,54	16,24	3615	3995
20,0	116	21,58	21,53	21,66	4846	5302

**Tabela 5.11 - Valores registados no Ensaio 4 para um vão de 0,4 m**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu\text{m}$ ]	
5,0	29	6,50	6,65	6,49	1176	1365
10,0	58	10,36	12,19	10,93	2384	2674
15,0	87	16,81	16,3	14,89	3613	3991
20,0	116	18,19	19,11	19,62	4846	5302

**Tabela 5.12 - Valores registados no Ensaio 4 para um vão de 0,2 m**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	Manómetro [bar]	Digiforce [kN]			Extensómetros [ $\mu\text{m}$ ]	
5,0	29	7,26	8,17	8,58	1178	1370
10,0	58	9,1	9,12	10,37	2408	2699
15,0	87	14,54	18,14	17,02	3598	3975
20,0	116	22,6	24,16	21,2	4846	5301

**Tabela 5.13 - Diferença entre  $F_{\text{Hooke}}$  e  $F_{\text{célula}}$  para o Ensaio 4**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	L = 0,6 m	Diferença	L = 0,4 m	Diferença	L = 0,2 m	Diferença
5,0	4,99 kN	-0,20%	4,99 kN	-0,20%	5,00 kN	0,00%
10,0	9,91 kN	-0,90%	9,93 kN	-0,70%	10,03 kN	0,30%
15,0	14,94 kN	-0,40%	14,93 kN	-0,47%	14,87 kN	-0,87%
20,0	19,93 kN	-0,35%	19,93 kN	-0,35%	19,92 kN	-0,40%

**Tabela 5.14 - Diferença entre  $F_{\text{Digiforce}}$  e  $F_{\text{célula}}$  para o Ensaio 4**

$F_{\text{célula}}$ [kN]	L = 0,6 m	Diferença	L = 0,4 m	Diferença	L = 0,2 m	Diferença
5,0	6,08 kN	21,60%	6,55 kN	30,93%	8,00 kN	60,07%
10,0	11,49 kN	14,93%	11,16 kN	11,60%	9,53 kN	-4,70%
15,0	16,42 kN	9,44%	16,00 kN	6,67%	16,57 kN	10,44%
20,0	21,59 kN	7,95%	18,97 kN	-5,13%	22,65 kN	13,27%

As diferenças entre  $F_{\text{Hooke}}$  e  $F_{\text{célula}}$  são menores do que 1 %, pelo que podem ser desprezadas por serem muito pequenos.

Constata-se que as diferenças entre  $F_{\text{Digiforce}}$  e  $F_{\text{célula}}$  diminuem com o aumento da força aplicada ao fio de pré-esforço, utilizando as cunhas para limitar o comprimento do vão livre, excepto para o caso em que o vão é de 0,2 m.

Analisando, outra vez, as diferenças correspondentes à força de 20 kN, conclui-se que estas são inferiores a 8 % para um vão livre de 0,6 m e de 0,4 m. No entanto, quando se limita o fio de pré-esforço apenas em 0,2 m, as diferenças são da ordem de 13 %, pondo em causa a fiabilidade dos resultados obtidos pelo *Digiforce* [1].

Dos resultados obtidos pode-se concluir que este sistema de cunhas apresenta potencial para ser implementado em fábrica.

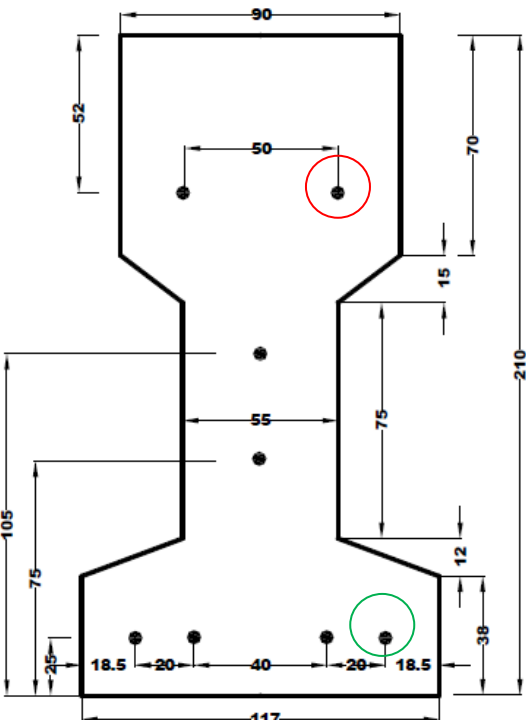
Tal como foi mostrado no Ensaio 3, chegou-se, novamente, à conclusão de que o *Digiforce* [1] não se adequa como ferramenta de medição do valor de pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes, pelas mesmas razões que foram atrás mencionadas.

#### 5.1.4 Testes realizados na fábrica da Secil Prebetão

Foram realizados dois ensaios na fábrica da Secil Prebetão, sediada no Alto Estanqueiro – Jardim. Pretende-se verificar, como foi dito atrás, se é possível implementar, antes da fase de betonagem, um método para a quantificação do pré-esforço aplicado durante o processo de fabrico de elementos pré-tensionados com recurso ao *Digiforce* [1]. Os testes foram feitos em fios de pré-esforço utilizados no fabrico de perfis I20, idênticos àquele que foi utilizado nos ensaios laboratoriais.

Na Tabela 5.15, fornecida pela Secil Prebetão, podem ser vistas as características gerais destes perfis.

**Tabela 5.15 - Características dos perfis I20**

	<b>Designação:</b> Perfil I20
	<b>Massa:</b> 42 kg/m
	<b>M<sub>Rd</sub> (+):</b> 19,40 kNm
	<b>V<sub>Rd</sub>:</b> 25,21 kN
	<b>Vão aconselhável:</b> < 10,0 m
	<b>Materiais:</b> Betão C25/30 Recobrimento: 20 mm Aço de pré-esforço: 8φ5 (f <sub>puk</sub> =1770 MPa)
	<b>Tolerâncias (mm):</b> Comprimento: +/- 25 Altura: +/- 10 Restantes medidas: +/- 6 Posicionamento dos aços: +/- 6
	<b>Tensão manómetro (bar):</b> φ 5: 17,0 +/- 5%

Optou-se por implementar na fábrica o sistema de grampos do Ensaio 2 e um sistema baseado nos perfis *RHS* usados no Ensaio 3. Este último sistema consiste em duas peças metálicas que foram dimensionadas para encaixar perfeitamente num fio de pré-esforço, de modo a exercer o seu peso sobre o mesmo fio.

Os ensaios foram realizados numa das extremidades da pista da fábrica, após o tensionamento de todos os fios de pré-esforço, enquanto decorria a operação de betonagem na extremidade oposta da pista. Escolheu-se este local para a execução dos testes por duas razões: a primeira prendeu-se com o tempo disponível para realizar todos os testes necessários, uma vez que não era possível interromper a operação de betonagem; a segunda deveu-se ao facto de ser uma

zona onde os fios de pré-esforço não tocavam no pavimento, permitindo aplicar o sistema das peças metálicas.

#### 5.1.4.1 Ensaio com sistema de peças metálicas

Este sistema, composto por duas peças metálicas, foi concebido no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Cada uma dessas peças metálicas é constituída por uma chapa de aço com 400 x 200 x 8 mm que assenta perpendicularmente sobre uma chapa de aço com 200 x 100 x 4 mm e uma outra com 200 x 80 x 4 mm. Estas duas últimas chapas foram soldadas à primeira nos lados com 200 mm de comprimento. Ainda foram soldados quatro reforços triangulares com 40 x 80 x 4 mm, um em cada canto, posicionados a 30 mm das faces de maior dimensão da chapa com 8 mm de espessura. Por fim, foi soldada à chapa com 200 x 80 x 4 mm uma tira de aço com 200 x 20 x 4 mm, formando um ângulo de, aproximadamente, 45 ° entre ambas. O fio de pré-esforço testado na fábrica ficou preso entre essas duas chapas (ver Figura 5.15).

Foram utilizadas duas chapas de aço com 400 x 200 x 8 mm e outras duas chapas de aço com 400 x 200 x 4 mm para a concepção deste sistema. As chapas com 4 mm de espessura foram cortadas com recurso a um serrote mecânico.

No Anexo 1 encontram-se as peças deste sistema, desenhadas com as respectivas dimensões.



**Figura 5.15 – Fixação de um fio de pré-esforço tensionado com uma peça metálica**

O ensaio em fábrica incidiu sobre o fio de pré-esforço marcado com um círculo verde na figura da Tabela 5.15. As peças metálicas foram utilizadas para definir cinco vãos com comprimentos diferentes, respectivamente de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m e 5 m. A distância que separa os dois apoios é medida entre as faces interiores das chapas de 400 x 200 x 8 mm (ver Figura 5.16).

Em cada um dos cinco casos em estudo foram realizadas três leituras com o *Digiforce* [1]. De modo a eliminar eventuais erros de leitura, por parte do aparelho, que pudessem ser originados pela vibração destas peças metálicas, foi colocado um cubo de betão com 150 mm de aresta no centro de cada apoio metálico. De seguida efectuaram-se, novamente, três medições para cada um dos cinco

casos em estudo (ver Figura 5.17). A calibração do *Digiforce* [1] e o procedimento das leituras, com este aparelho, encontram-se descritos na subsecção 5.1.2.2.



Figura 5.16 - Distância do vão livre entre peças metálicas

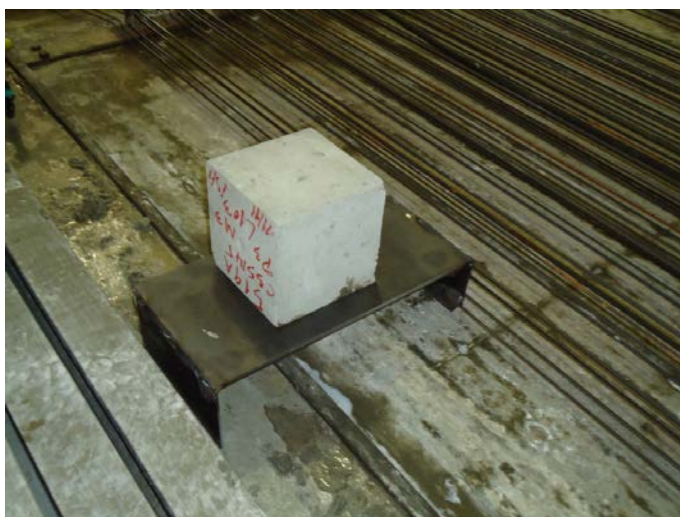


Figura 5.17 - Amortecimento de eventuais vibrações das peças metálicas com um cubo de betão

#### 5.1.4.2 Ensaio com sistema de grampos

O sistema de grampos foi utilizado para se efectuarem medições no fio de pré-esforço marcado com um círculo vermelho na figura da Tabela 5.15.

Primeiro, pousou-se o varão de aço deste sistema sobre dois cubos de betão com 150 mm de lado, para que os grampos ficassem nivelados com o fio de pré-esforço. Depois de apertar os grampos contra o fio, efectuaram-se três leituras com o *Digiforce* [1]. A montagem deste sistema na pista da fábrica pode ser visualizada na Figura 5.18.

De modo a eliminar eventuais erros de leitura do *Digiforce* [1], erros esses causados pela possível vibração do sistema de grampos, as peças metálicas utilizadas no ensaio anterior foram assentes sobre o varão de aço que faz parte deste mesmo sistema. Estas peças foram travadas,



encaixando-as numa ranhura existente entre os perfis I20 já betonados nas imediações do local de ensaio (ver Figura 5.19). De seguida, voltaram-se a efectuar três leituras com o *Digiforce* [1].



Figura 5.18 - Montagem do sistema de grampos na pista da fábrica



Figura 5.19 - Amortecimento de eventuais vibrações do sistema de grampos com cubos de betão

## 5.1.5 Registo e análise de resultados

### 5.1.5.1 Ensaio com o sistema de peças metálicas

Como foi referido anteriormente, realizou-se o teste com as peças metálicas no fio de pré-esforço assinalado a verde na figura da Tabela 5.15.

Na Tabela 5.16 são apresentados os resultados obtidos pelo *Digiforce* [1] para este teste, sem que tivessem sido usados os cubos de betão para amortecer eventuais vibrações das peças metálicas.

Na Tabela 5.17 são apresentados os resultados do mesmo teste em que foram utilizados os cubos de betão como pesos para amortecer eventuais vibrações das peças metálicas.

**Tabela 5.16 – Forças obtidas com o *Digiforce* [1] sem usar cubos de betão como pesos**

L [m]	Digiforce [kN]			Média [kN]
1,0	15,98	15,13	15,08	15,40
2,0	17,16	16,82	17,27	17,08
3,0	18,73	17,89	16,93	17,85
4,0	18,51	17,89	16,93	17,78
5,0	19,05	19,22	19,01	19,09

**Tabela 5.17 – Forças obtidas com o *Digiforce* [1] usando cubos de betão como pesos**

L [m]	Digiforce [kN]			Média [kN]
1,0	13,30	13,32	12,25	12,96
2,0	15,88	16,00	15,88	15,92
3,0	18,73	18,92	19,20	18,95
4,0	18,70	19,19	19,25	19,05
5,0	17,96	17,74	18,08	17,93

Por fim, pode-se constatar que o uso dos blocos de betão para amortecer eventuais vibrações das peças metálicas, não afectou os resultados das forças obtidas e que, aparentemente, obtêm-se menores erros de leitura para medições efectuadas com um vão livre de 3 m, 4 m e 5 m.

Os valores médios destes tais ensaios, sem e com os blocos de betão, formam, respectivamente 18,2 kN e 18,6 kN.

#### **5.1.5.2 Ensaio com sistema de grampos**

Tal como foi referido anteriormente, este ensaio foi realizado no fio de pré-esforço assinalado a vermelho na figura da Tabela 5.15.

Na Tabela 5.18 são apresentados os resultados obtidos pelo *Digiforce* [1] para este teste, sem que tivessem sido usadas as peças metálicas para amortecer eventuais vibrações do sistema de grampos.

Na Tabela 5.19 são apresentados os resultados do mesmo teste em que foram usadas as peças metálicas como pesos para amortecer eventuais vibrações do sistema de grampos.

**Tabela 5.18 – Forças obtidas com o *Digiforce* [1] sem usar as peças metálicas como pesos**

L [m]	Digiforce [kN]			Média [kN]
1,4	22,45	19,96	23,57	21,99

**Tabela 5.19 – Forças obtidas com o *Digiforce* [1] usando as peças metálicas como pesos**

L [m]	Digiforce [kN]			Média [kN]
1,4	18,49	19,09	23,08	20,22

O uso das duas peças metálicas para amortecer eventuais vibrações do sistema de grampos teve uma influência reduzida no valor das forças lidas pelo aparelho de medição.



## 5.2 Ensaios realizados com um laser e um acelerómetro

### 5.2.1 Objectivo

Foram realizados dois ensaios experimentais para determinar a frequência de vibração fundamental de um fio de pré-esforço com 2,5 m de comprimento e com 5,0 mm de diâmetro. Para o efeito, utilizou-se um laser para registar as amplitudes das vibrações impostas ao fio de pré-esforço e um acelerómetro para registar as acelerações causadas por essas mesmas vibrações.

Os valores medidos por estes dois aparelhos foram, posteriormente, processados por um analisador de dados em conjunto com o *software LabVIEW* [28].

As amplitudes e as acelerações medidas foram registadas no domínio do tempo. Estes dados foram, depois, convertidos para o domínio da frequência, efectuando-se uma *FFT* (Transformada Rápida de Fourier). Através do respectivo espectro de frequências, conseguiu-se extrair a frequência fundamental do fio de pré-esforço.

Os ensaios experimentais acima descritos foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

### 5.2.2 Sistema de pré-esforço

Os presentes ensaios experimentais foram realizados no pórtico existente nas instalações do laboratório atrás referido, tendo sido utilizado o mesmo sistema de pré-esforço e o mesmo fio de pré-esforço que foram adoptados nos testes laboratoriais com o *Digiforce* [1].

A montagem do referido sistema de pré-esforço pode ser consultada na subsecção 5.1.2.1.

### 5.2.3 Equipamentos de medição

Para o primeiro ensaio experimental, doravante designado por Ensaio A, foi utilizado um laser da marca *Baumer* [2], modelo OADM 20I4560/S14C, em conjunto com o sistema de pré-esforço acima mencionado (ver Figura 5.20). Este dispositivo foi alinhado por baixo do fio de pré-esforço, no meio do vão livre, ficando posicionado a uma distância de 65 mm da sua face inferior. Depois, utilizaram-se chapas de aço para imobilizar o aparelho, de modo que o feixe de laser emitido se mantivesse sempre alinhado com o fio de pré-esforço. Por fim, envolveu-se a parte central do fio num pedaço de papel branco e em fita adesiva, para reflectir melhor o feixe de laser emitido.

Na Figura 5.21 pode-se ver, em pormenor, o posicionamento deste laser.



**Figura 5.20 - Sistema de ensaio com o laser**



**Figura 5.21 - Posicionamento do laser**

Para o segundo ensaio experimental, doravante designado por Ensaio B, usou-se um acelerómetro da marca *PCB Piezotronics* [32], modelo 333B32, e o já referido sistema de pré-esforço. Este acelerómetro foi posicionado por cima do fio de pré-esforço, no meio do vão livre, e foi envolto, de seguida, em fita adesiva de modo a ficar firmemente fixo ao fio (ver Figura 5.22).



Figura 5.22 - Posicionamento do acelerômetro

#### 5.2.4 Sistema de aquisição de dados

O laser e o acelerômetro foram ligados a um bloco terminal da marca *National Instruments* [28], modelo SCXI-1314. Este bloco, por sua vez, foi ligado a um analisador de dados, também da marca *National Instruments* [28], modelo PXI-1052, que é utilizado para calcular a frequência de vibração fundamental do fio de pré-esforço.

Uma fonte de corrente externa de 24 V foi ligada ao bloco terminal, referido anteriormente, de modo a alimentar o laser e o acelerômetro.

Na Figura 5.23 pode ser visualizada a montagem dos três aparelhos atrás mencionados.

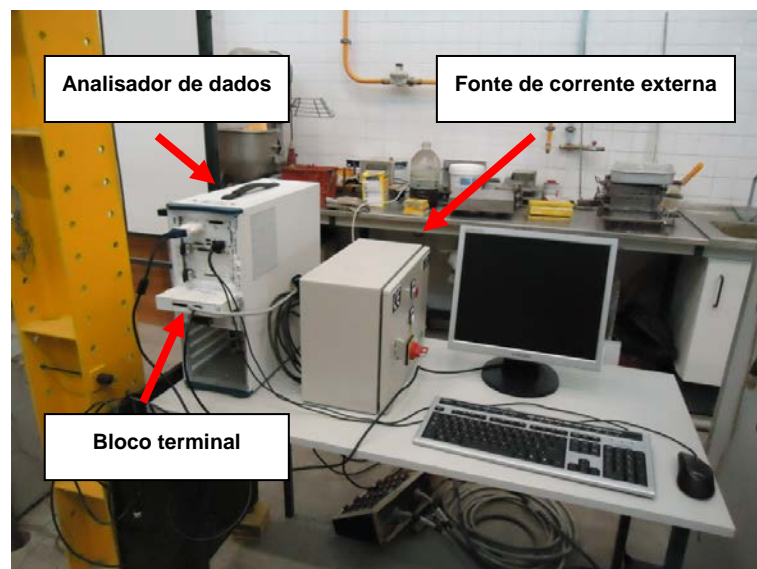


Figura 5.23 - Equipamento de processamento de dados

Com recurso ao *software LabVIEW* [28] que vem integrado com o analisador de dados, procedeu-se à calibração do laser e do acelerómetro.

O laser foi calibrado para registar as amplitudes das vibrações impostas ao fio de pré-esforço, em mm. Por outro lado, o acelerómetro foi calibrado para registar as acelerações resultantes das vibrações do fio de pré-esforço, em  $\text{m/s}^2$ . Os dados recolhidos por estes dois equipamentos foram medidos em ordem ao tempo.

Utilizando o *LabVIEW* [28], efectuou-se uma *FFT* aos dados anteriormente referidos, de forma a convertê-los do domínio do tempo para o domínio da frequência. Após esta operação, obteve-se, para cada um dos aparelhos, um espectro de frequências. A posição do primeiro pico, no eixo horizontal desse espectro, corresponde à frequência de vibração fundamental que se pretendia obter.

Para se compreender melhor o conceito da utilização da *FFT*, é mostrado, a título de exemplo, na Figura 5.24, o sinal gravado de uma corda de guitarra no domínio do tempo. Na Figura 5.25 é mostrado o respectivo espectro de frequências que foi obtido após se ter efectuado uma *FFT* ao sinal ilustrado na figura anterior.

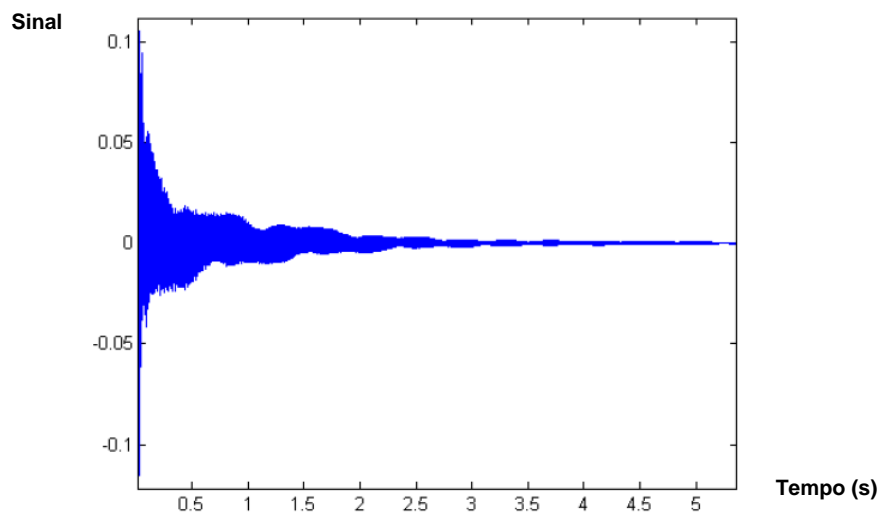


Figura 5.24 - Sinal gravado de uma corda de guitarra [26]

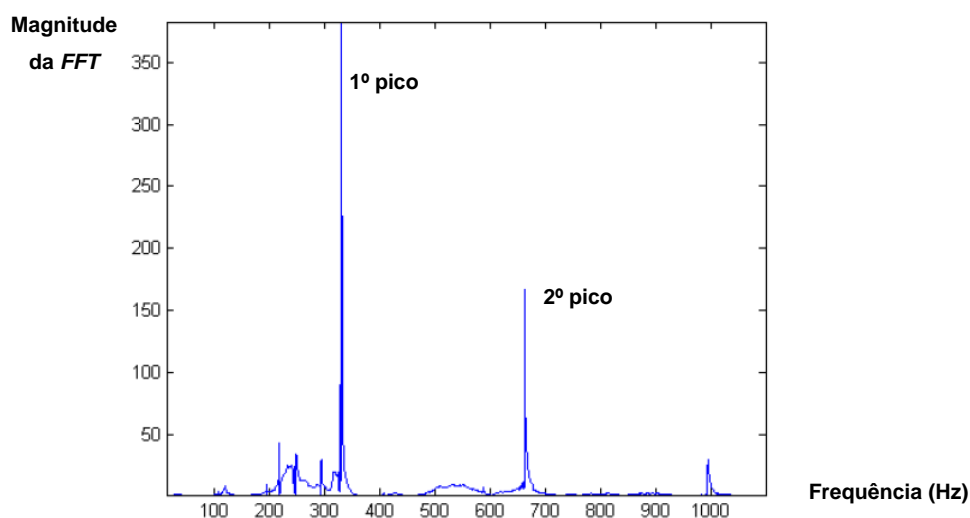


Figura 5.25 - Espectro de frequências da corda de guitarra [26]

### 5.2.5 Procedimento experimental

Nos dois ensaios experimentais realizados, o fio de pré-esforço foi tensionado até 20 kN, com incrementos de carga de 5 kN, depois de se ter calibrado o *data logger*. Em cada um dos quatro patamares de carga (5 kN, 10 kN, 15 kN e 20 kN), deu-se uma leve pancada com um martelo de aço, perto da secção a meio vão do fio, de forma a causar a sua vibração. De seguida, registou-se o valor da frequência fundamental calculada pelo *LabVIEW* [28]. Foram anotados, também, os respectivos valores das forças registadas pela célula de carga e da pressão manométrica correspondente, bem como os valores das extensões medidas pelos extensómetros.

Salienta-se que, no Ensaio B, bastou dar uma pancada com o dedo indicador para fazer vibrar o fio de pré-esforço. Teve-se de proceder desta maneira devido à alta sensibilidade do acelerómetro. Nesse ensaio, o uso do martelo de aço conduziu a valores de frequências muito divergentes dos valores esperados.

### 5.2.6 Registo e análise de resultados

Na Tabela 5.20 encontram-se as forças lidas pela célula de carga,  $F_{célula}$ , a pressão manométrica correspondente e as forças elásticas calculadas pela lei de Hooke,  $F_{Hooke}$ , usando os valores médios das extensões registadas pelos extensómetros. Estes valores registados são referentes ao Ensaio A.

Na Tabela 5.21 encontram-se os dados mencionados na tabela anterior que foram registados no Ensaio B.

**Tabela 5.20 - Dados registados para o Ensaio A**

$F_{célula}$ [kN]	Manómetro [bar]	Extensómetros [ $\mu$ m]		$F_{Hooke}$ [kN]	Diferença
5,0	29	1383	1133	4,94	-1,20%
10,0	58	2691	2340	9,88	-1,20%
15,0	87	4010	3570	14,88	-0,80%
20,0	116	5387	4864	20,13	0,65%

**Tabela 5.21 - Dados registados para o Ensaio B**

$F_{célula}$ [kN]	Manómetro [bar]	Extensómetros [ $\mu$ m]		$F_{Hooke}$ [kN]	Diferença
5,0	29	1380	1130	4,93	-1,40%
10,0	58	2688	2337	9,87	-1,30%
15,0	87	4012	3572	14,89	-0,73%
20,0	116	5403	4880	20,19	0,95%

Na Tabela 5.22 é feita uma comparação entre as frequências fundamentais obtidas pelo laser,  $f_{laser}$ , e as frequências fundamentais calculadas com as forças medidas pela célula de carga,  $f_{exacta}$ . Estas frequências foram determinadas através da Equação (2.11), sabendo-se que a massa distribuída do fio,  $w$ , é igual a 0,154 kg/m, o vão livre,  $L$ , é igual a 2,08 m, e que  $F_{célula}$  representa as forças medidas pela célula de carga.

Na mesma tabela também é feita uma comparação entre as forças lidas pela célula de carga,  $F_{célula}$ , e as forças calculadas com as frequências fundamentais que foram obtidas pelo laser,  $F_{laser}$ .

Estas forças foram calculadas a partir da Equação (2.15), com os valores de  $w$ ,  $L$ , e  $F$  que, ainda agora, foram referidos.

Na Tabela 5.23 é feita uma comparação entre as frequências obtidas pelo acelerómetro,  $f_{acel}$ , e as frequências calculadas com as forças medidas pela célula de carga,  $f_{exacta}$ . É feita, também, uma comparação entre as forças calculadas com as frequências fundamentais captadas pelo acelerómetro,  $F_{acel}$ , e as forças medidas pela célula de carga,  $F_{célula}$ .

**Tabela 5.22 - Ensaio A: Comparação de  $f_{exacta}$  com  $f_{laser}$  e de  $F_{célula}$  com  $F_{laser}$**

$f_{exacta}$ [Hz]	$f_{laser}$ [Hz]	Diferença	$F_{célula}$ [kN]	$F_{laser}$ [kN]	Diferença
43,31	44,20	2,04%	5,0	5,21	4,13%
61,26	62,50	2,03%	10,0	10,41	4,10%
75,02	76,50	1,97%	15,0	15,60	3,98%
86,63	88,00	1,58%	20,0	20,64	3,19%

**Tabela 5.23 - Ensaio B: Comparação de  $f_{exacta}$  com  $f_{acel}$  e de  $F_{célula}$  com  $F_{acel}$**

$f_{exacta}$ [Hz]	$f_{acel}$ [Hz]	Diferença	$F_{célula}$ [kN]	$F_{acel}$ [kN]	Diferença
43,31	43,70	0,89%	5,0	5,09	1,79%
61,26	60,80	-0,74%	10,0	9,85	-1,48%
75,02	74,40	-0,83%	15,0	14,75	-1,65%
86,63	86,50	-0,15%	20,0	19,94	-0,30%

No Ensaio A constata-se que  $f_{laser}$  se aproxima muito de  $f_{exacta}$ . As diferenças entre  $f_{laser}$  e  $f_{exacta}$  diminuem com o aumento de carga aplicada ao fio de pré-esforço, registando-se uma diferença máxima de 2,04 %. Analogamente, as diferenças entre  $F_{laser}$  e  $F_{célula}$  também diminuem à medida que o pré-esforço aplicado ao fio aumenta, verificando-se uma diferença máxima de 4,13 %.

Em relação ao Ensaio B, verifica-se que  $f_{acel}$  se aproxima ainda mais de  $f_{exacta}$  do que no teste anterior. As diferenças entre  $f_{acel}$  e  $f_{exacta}$  diminuem com o aumento do pré-esforço, excepto para a situação de 15 kN, em que se registou um ligeiro aumento em relação à leitura para 10 kN. Apesar disso, as diferenças obtidas no Ensaio B são bastante inferiores àqueles que foram obtidos no Ensaio A, verificando-se uma diferença máxima de 0,89 % entre  $f_{acel}$  e  $f_{exacta}$ . Relativamente às diferenças entre  $F_{acel}$  e  $F_{célula}$ , constata-se que estes variam da mesma forma que as diferenças entre as frequências  $f_{acel}$  e  $f_{exacta}$ , tendo-se registado uma diferença máxima de 1,79 %.

Salienta-se que  $F_{acel}$  foi obtida através da Equação (2.15), desprezando a massa do acelerómetro. As diferenças introduzidas nos valores de  $F_{acel}$  são desprezáveis, uma vez que o acelerómetro pesa apenas 4 g e a massa do fio de pré-esforço é de, aproximadamente, 320 g, para um vão livre de 2,08 m. Porém, esta aproximação pode introduzir erros significativos, caso o vão livre do fio de pré-esforço seja muito reduzido.

Considere-se uma situação prática em que se pretende medir o pré-esforço instalado num elemento pré-tensionado existente. Se for feita uma abertura no betão com 100 mm de comprimento, a massa do acelerómetro (4 g) já não é desprezável em comparação com a massa do fio de pré-esforço (15,4 g). Assim, à partida, já não é possível obter resultados fiáveis através da equação da

corda vibrante, uma vez que esta considera, apenas, a massa distribuída do fio sem quaisquer massas adicionais.

Como solução alternativa pode-se usar um laser, semelhante ao que foi adoptado no Ensaio A, que consiga captar frequências de vibração mais elevadas. A vantagem deste último método reside no facto de não ser preciso acoplar nenhum equipamento de medição ao fio de pré-esforço a ser examinado. É apenas necessário efectuar no betão uma pequena abertura que possibilite a livre vibração do fio e que permita a um operador atingi-lo com uma leve pancada.

Na Tabela 5.24 é mostrado o tempo de resposta exigido por parte do laser, de modo a que este consiga captar as frequências de vibração de um fio de pré-esforço com dois vãos distintos. Esse tempo de resposta,  $T_{laser}$ , é dado pelo inverso da frequência fundamental do fio de pré-esforço,  $f_{exacta}$ , nos dois casos sob análise. Por sua vez, a frequência fundamental foi calculada através da Equação (2.11), com os valores de  $F$  e de  $L$  indicados na mesma tabela, para um fio de pré-esforço com uma massa distribuída,  $w$ , igual a 0,154 kg/m.

**Tabela 5.24 - Tempo de resposta do laser para um fio com dois vãos distintos**

F [kN]	L [m]	$f_{exacta}$ [Hz]	$T_{laser}$ [ms]
20,0	2,08	86,63	11,54
20,0	0,1	1801,87	0,55

Optou-se por analisar a frequência fundamental para uma força de 20 kN, nos dois casos sob análise, por se tratar de uma situação crítica no sentido de que condiciona o tempo de resposta exigido por parte do laser. Como foi referido atrás, o tempo de resposta é dado pelo inverso da frequência, frequência essa que aumenta com o encurtamento do vão do fio de pré-esforço e com o aumento da força de tracção que lhe é aplicada. Portanto, quanto maior for a frequência de vibração, menor será o tempo de resposta exigido ao aparelho.

O laser utilizado no Ensaio A possui um tempo de resposta inferior a 10 ms, segundo o fabricante [2]. Este dispositivo mostrou ser suficientemente sensível para captar as frequências de vibração do fio de pré-esforço, utilizado nesse ensaio, com um vão livre de 2,08 m. No entanto, para a situação prática que foi mencionada atrás, na qual é feita uma abertura com 100 mm num elemento pré-tensionado existente, o tempo de resposta exigido ao laser é reduzido para 0,55 ms.

Existem no mercado lasers com tempos de resposta inferiores a 0,25 ms que possibilitam a implementação deste sistema na situação prática acima referida. Refere-se, como exemplo, o laser da marca *Baumer*, modelo OHDK 10 [2].

### 5.3 Considerações finais

Os três sistemas testados em laboratório para reduzir o comprimento do vão livre do fio de pré-esforço utilizado apresentam bons resultados, uma vez que as forças estimadas pelo *Digiforce* [1] possuem diferenças inferiores a 10 %. No entanto, os sistemas de perfis *RHS* e de cunhas apresentam diferenças significativas nas forças medidas pelo *Digiforce* [1] quando o vão livre do fio de pré-esforço é limitado a 0,2 m.

Concluiu-se que o *Digiforce* [1] não se adequa como ferramenta de medição directa do valor de pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes, por ser necessário efectuar uma abertura de dimensões consideráveis nesses elementos, de modo a poderem ser feitas leituras com algum rigor.

Para testar correctamente os dois sistemas adoptados e ensaiados em fábrica (sistema de peças metálicas e de grampos), é necessário que as medições efectuadas com o *Digiforce* [1] sejam feitas antes de se dar início à operação de betonagem, de modo a evitar erros de medição. Aconselha-se a usar um vão livre de 5 m, caso se escolha utilizar o sistema composto pelas duas peças metálicas, pelo facto de os erros de medição serem menores para esta situação e, também, por recomendação do fabricante [1].

O laser e o acelerómetro conduziram a resultados bastante satisfatórios, na medida em que apresentam diferenças pequenas entre as forças registadas pela célula de carga e as forças calculadas através da equação da corda vibrante.

Com o laser, as forças obtidas pela equação da corda vibrante apresentam erros inferiores a 5 %, ao passo que, com o acelerómetro, as forças calculadas com a mesma equação, apresentam erros inferiores a 2 %.

Do ponto de vista prático, é melhor implementar o laser do que o acelerómetro, para quantificar o pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes. Apesar de o sistema laser ter apresentado erros superiores ao acelerómetro nos ensaios experimentais realizados, este sistema não introduz massas adicionais no fio de pré-esforço, possibilitando a aplicação directa da equação da corda vibrante para calcular o pré-esforço instalado nesse mesmo fio.



## 6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões relativas ao ensaio por medição da resistência eléctrica, levado a cabo no laboratório de investigação e desenvolvimento do DEE. São apresentadas, também, as conclusões mais relevantes dos ensaios por medição de vibrações, realizados com o *Digiforce* [1], com o laser e com o acelerómetro, no Laboratório de Estruturas do DEC e na fábrica da Secil Prebetão. Por último, é apresentada uma proposta para desenvolvimentos futuros, visando validar a implementação do laser numa situação prática.

### 6.1 Ensaio experimental por medição da resistência eléctrica

Para este ensaio experimental é necessário um elevado grau de precisão para se obter a recta de calibração experimental que relaciona a variação da resistência eléctrica com a força de tensionamento aplicada ao fio de pré-esforço utilizado, com 1,2 m de comprimento. Tal deve-se ao facto de a resistência eléctrica do fio ser muito pequena e serem necessárias, pelo menos, cinco casas decimais para quantificar, com uma precisão razoável, a sua variação.

Não foi possível obter a equação de calibração esperada devido aos erros introduzidos pelas flutuações da própria rede eléctrica (usada para alimentar a fonte de corrente ajustável), que originaram erros a partir da segunda casa decimal, nos valores de resistência eléctrica do fio de aço. De modo a contornar este problema, seria preciso utilizar uma fonte de alimentação externa que não possuísse estas flutuações ou, então, uma fonte de alimentação cujas flutuações introduzissem erros inferiores à quinta casa decimal nos valores de resistência eléctrica.

### 6.2 Ensaio por ultrassons

Não foi possível concretizar o presente ensaio devido à avaria do equipamento de ultrassons. Consequentemente, não foi possível obter, experimentalmente, uma curva de calibração que relacione a variação da velocidade de propagação de ondas ultra-sonoras com o valor do pré-esforço aplicado a um fio de aço com 5 mm de diâmetro e 1,2 m de comprimento para, posteriormente, compará-la à curva de calibração obtida por *Chaki & Bourse* [3].

### 6.3 Testes realizados com o *Digiforce*

Os três sistemas testados em laboratório para limitar o vão livre do fio de pré-esforço com 2,5 m de comprimento, apresentaram bons resultados, dado que as forças estimadas pelo *Digiforce* [1] possuem erros inferiores a 10 %.

Experimentou-se averiguar se o *Digiforce* [1] seria adequado como ferramenta de medição directa do pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes. Os ensaios laboratoriais realizados com o sistema de perfis *RHS* e com o sistema de cunhas, serviram para simular uma

situação real em que se efectuava um rasgo longitudinal num elemento pré-tensionado, para poderem ser feitas leituras com o *Digiforce* [1] nos fios de pré-esforço expostos. Concluiu-se que seria preciso, no mínimo, efectuar um rasgo com 0,4 m de comprimento, inviabilizando o uso deste equipamento para a inspecção de elementos pré-tensionados existentes.

De modo a evitar estes erros de medição, torna-se necessário efectuar as medições com o *Digiforce* [1] antes da operação de betonagem, utilizando o sistema de grampos ou o sistema composto pelas peças metálicas para reduzir o comprimento do vão livre dos fios de pré-esforço. No caso de se usar o segundo sistema, é aconselhável efectuar as medições para um vão de 5m.

## 6.4 Ensaios experimentais com o laser e acelerómetro

Conseguiu-se quantificar o pré-esforço aplicado a um fio de aço com 2,5 m de comprimento, utilizando, para o efeito, um laser e um acelerómetro. Através da frequência de vibração fundamental do fio de pré-esforço que foi obtida por estes dois equipamentos, calculou-se a força instalada nesse mesmo fio com recurso à equação da corda vibrante.

Os erros associados às forças calculadas com a frequência fundamental obtida pelo laser, são inferiores a 5 % quando estas forças são comparadas com aquelas que foram medidas pela célula de carga. Por outro lado, os erros associados às forças calculadas com a frequência fundamental obtida pelo acelerómetro, são inferiores a 2 % em relação às forças medidas pela célula de carga.

De entre os dois métodos testados, o laser é o que mais se adequa a uma situação prática, na qual se pretende quantificar o pré-esforço instalado em elementos pré-tensionados existentes. Este dispositivo, ao contrário do acelerómetro, não introduz massas adicionais no fio de pré-esforço a ser analisado. Tal facto é de extrema importância, visto que a equação da corda vibrante considera apenas a massa distribuída do fio de pré-esforço sem quaisquer massas adicionais.

Para melhor se visualizar o erro que a massa do acelerómetro pode, eventualmente, introduzir nas medições da frequência de vibração do fio de pré-esforço, considere-se que é feita uma abertura com 100 mm de comprimento num elemento pré-tensionado qualquer. Neste caso, a massa do acelerómetro (4 g) já não é desprezável face à massa do fio de pré-esforço (15,4 g). Portanto, a aplicação directa da Equação (2.15) para calcular o valor do pré-esforço instalado no fio, pode conduzir a resultados pouco interessantes. É por esta razão que se sugere, como alternativa, utilizar um laser, semelhante ao que foi adoptado nos ensaios experimentais do subcapítulo 5.2, que consiga captar frequências mais elevadas. Neste caso, é apenas necessário efectuar uma pequena abertura no betão que possibilite a livre vibração do fio, e que permita a um operador atingi-lo com uma leve pancada.

## 6.5 Propostas para desenvolvimentos futuros

Propõe-se que, no futuro, se repita o ensaio experimental realizado com o laser, recorrendo-se ao uso de um dispositivo mais sensível, num fio de pré-esforço com um vão livre de 100 mm. Pretende-se, com esse ensaio, averiguar se, de facto, é possível obter resultados fiáveis nessas condições e, ao mesmo tempo, estudar o grau de aplicabilidade do método proposto numa situação prática.

Em última análise, propõe-se que seja implementado esse método para quantificar o pré-esforço num elemento pré-tensionado, caso se obtenham resultados fidedignos do referido ensaio experimental.

Para se efectuar uma abertura no elemento pré-tensionado, sugere-se que tal seja feito com recurso à hidrodemolição do betão para não danificar os fios de pré-esforço. Sugere-se, também, que seja posicionada, sobre esse elemento, uma chapa de aço que possua uma abertura centrada com as dimensões pretendidas, de modo a direccionar o jacto de água.

Por último, sugere-se que seja repetido o ensaio de ultrassons, uma vez que este não chegou a ser concretizado.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Applied Measurements Limited - "Portable Battery Powered Hand Held Tension Measurement Device - Digiforce", 2009.
- [2] Baumer Group. Catálogo de fichas técnicas.
- [3] Chaki, S.; Bourse, G. - "Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels". Ultrasonics, vol. 49, no. 2, pp. 162-171, Fevereiro 2009.
- [4] Choquet, P.; Quirion, M.; Juneau, F. - "Advances in Fabry-Perot Fiber Optic Sensors and Instruments for Geotechnical Monitoring". Geotechnical News, Março 2000.
- [5] Dai, Jingyun et al. - "Applications of Fiber Optic Sensors in Concrete Structural Health". Proceeding of SPIE: Advanced Sensor Systems and Applications III, vol. 6830, Pequim, 2007.
- [6] Delepine-Lesoille, S.; Merliot, E.; Gautier, Y. - "Optical fiber strain sensors for use in civil engineering: State-of-the-art, industrial applications and outlook". BLPC, no. 252, Outubro/Novembro 2008.
- [7] Dunnicliff, J. - "Distributed Fiber Optic Sensors: Novel Tools for the Monitoring of Large Structures". Geotechnical Instrumentation News, no. 52, pp. 8-10, Setembro 2007.
- [8] Dunnicliff, J. - "Overview of Optic Fiber Sensing Technologies for Geotechnical Instrumentation and Monitoring". Geotechnical Instrumentation News, no. 52, pp. 5-6, Setembro 2007.
- [9] Enerpac. Catálogo de fichas técnicas.
- [10] Especificação LNEC E440-1995. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- [11] Fabo, P.; Jarosevic, A.; Chandoga, M. - "The Smart Tendons - A New Approach to Prestressing". fib Symposium, Avignon, Abril 2004.
- [12] Fonseca, J.; Branco, F.; Caldinhas, A. - "Extensometria Elástica de Resistência". Lisboa: Laboratório de Resistência de Materiais, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 1979.
- [13] Geib, D - "Multiplexing of Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors for Strain Measurements". Master of Science Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [14] Geokon, Inc. Catálogo de fichas técnicas.
- [15] Group, Vishay Precision - "The Three-Wire Quarter-Bridge Circuit". Strain Gages and Instruments, Application Note TT-612, 2010.
- [16] H & M Analytical Services, Inc - "Analysis of Residual Stress". 2002.
- [17] Hirao, Masahiko - Hirao Laboratory. Osaka University. Disponível em: <http://www-ndc.me.es.osaka-u.ac.jp/pmwiki/pmwiki.php?n=Research.EMATs>. (Consult. em Janeiro 2011).
- [18] Inaudi, D. - "Field Testing and Application of Fiber Optic Displacement Sensors in Civil Structures". Optical Fiber Sensors, Williamsburg, Outubro 1997.
- [19] Inaudi, D. et al. - "SOFO - Structural Monitoring with Fiber Optic Sensors". FIB: Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures, pp. 2-4, Vienna, Fevereiro 1999.

- [20] Inaudi, D. et al. - "Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil engineering structures". Sensors and Actuators A: physical, vol. 44, no. 2, pp. 125-130, Agosto 1994.
- [21] ISO-TECH. Catálogo de fichas técnicas.
- [22] Kanetec. Catálogo de fichas técnicas.
- [23] Krautkramer. Catálogo de fichas técnicas.
- [24] Landes, H.; Kaltenbacher, M.; Lerch, R. - "Large Scale Computation of Coupled Electro-Acoustic Systems using ANSYS and CAPA". NAFEMS-Seminar: Computational Acoustics, 1999.
- [25] Larson, B. - NDT Education Resource Center. Disponível em: [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc\\_ut\\_index.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm). (Consult. em Novembro 2010).
- [26] Lee, Nelson - "Another Way of Viewing the World". Connexions module: m13514, 2007.
- [27] Meller, S. - "Extrinsic Fabry-Perot Interferometer System Using Wavelength Modulated Source". Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [28] National Instruments. Catálogo de fichas técnicas.
- [29] Nave, R. - HyperPhysics. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hphys.html>. (Consult. em Novembro 2010).
- [30] Nellen, P.; Brönnimann, R.; Sennhauser, U. - "Optical Fiber Bragg Gratings for Structural Monitoring in Civil Engineering". 16th Congress of IASBE, Lucerne, 2000.
- [31] Olympus NDT. Notas técnicas sobre transdutores ultrassonoros.
- [32] PCB Piezotronics. Catálogo de fichas técnicas.
- [33] Penamakuru, S. - "Optimization of Electromagnetic Acoustic Transducers for Nondestructive Evaluation of Concrete Structures". Master of Science Thesis. Faculty of the Graduate school at the University of Missouri-Columbia, 2008.
- [34] Pinet, E. - "Fabry-Pérot Fiber-Optic Sensors for Physical Parameters Measurement in Challenging Conditions". Journal of Sensors, pp. 3-6, 2009.
- [35] Portela, A.; Silva, A. - "Mecânica dos Materiais". Lisboa: Plátano, 1996. Disponível em: [http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S\\_Estruturas/Mecanica\\_Meios\\_Continuos/upgrade/l\\_extensometria.pdf](http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Mecanica_Meios_Continuos/upgrade/l_extensometria.pdf). (Consult. em Outubro 2010).
- [36] Prevéry, P. - "X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques". Metals Handbook, vol. 10, pp. 380-392. Metals Park: American Society for Metals, 1986.
- [37] Rocha, A.S.; Nunes, R.M.; Hirsch, T.K - "Comparação entre difração de raios X e método do furo cego para medição de tensões residuais em barras cilíndricas". Revista Matéria, vol. 14, no. 3, pp. 965-976, 2009.
- [38] Santos, T.; Luz, A. - "Concepção, desenvolvimento e produção de sondas de ultrassons". Projecto de Produção Mecânica I e II. Instituto Superior Técnico, 2005.
- [39] Selker, J. et al. - "Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems". Water Resources Research, vol. 42, pp. 2-3, 2006.

- [40] Sensorland - Disponível em: <http://www.sensorland.com/HowPage005.html>. (Consult. em Dezembro 2010).
- [41] Sumitro, S; Jarosevic, A.; Wang, M. - "Elasto-Magnetic Sensor Utilization on Steel Cable Stress Measurement". Proceedings of the 1st fib Congress, vol. Session 15, pp. 79-86, Osaka, 2002.
- [42] Tektronix. Catálogo de fichas técnicas.
- [43] Thurlby Thandar Instruments. Catálogo de fichas técnicas.
- [44] Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. Catálogo de fichas técnicas.
- [45] Wang, M.; Wang, G.; Zhao, Y. - "Application of EM Stress Sensors in Large Steel Cables". Farhad Ansari (Ed.), Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, pp. 145-154. Holanda: Springer, 2005.
- [46] Washer, G. A.; Green, R. E.; Pond Jr., R. B. - "Velocity Constants for Ultrasonic Stress Measurement in Prestressing Tendons". Research in Nondestructive Evaluation, vol. 14, no. 2, pp. 81-94, 2002.
- [47] Wexham Developments. Catálogo de fichas técnicas.
- [48] Wikipedia. Disponível em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page). (Consult. em Janeiro 2011).
- [49] Zwick Roell. Arquivo de imprensa.